



Rodrigo Miguel Lopes Costa Marques Massena

Licenciatura em Ciências da Engenharia

AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA COM DIFERENTES TEORES DE METACAUPLINO EM EXPOSIÇÃO NATURAL

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Doutora, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientadora: Maria do Rosário Veiga, Doutora, Investigadora Principal, Chefe do NRI - LNEC

Júri:

Presidente: Professor Catedrático Fernando Manuel Anjos Henriques

Arguente: Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2011

“Copyright” Rodrigo Miguel Lopes Costa Marques Massena, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao terminar esta dissertação de mestrado, gostaria de agradecer a todos que, directa ou indirectamente, contribuíram para a sua realização.

À Professora Doutora Paulina Faria Rodrigues, orientadora desta dissertação, pela sua atenção e apoio, pelo tempo que despendeu na transição de conhecimentos e pelo material de estudo disponibilizado. Agradeço a sua constante disponibilidade e o estímulo transmitido durante a elaboração desta dissertação, sem esquecer a ajuda final na revisão de textos.

À engenheira Maria do Rosário Veiga, co-orientadora nesta dissertação, pela ajuda prestada, pelos conselhos e incentivos dados, pelo interesse manifestado e pelo tempo despendido.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde realizei a maior parte das pesquisas para o trabalho apresentado nesta dissertação, bem como algum trabalho experimental.

Aos experimentadores, Ana Maria Duarte e Leonel Silva, sempre prestáveis e incansáveis.

Ao Nuno Felgueiras e à Sónia Robalo, companheiros de trabalho ao longo da dissertação, obrigado pela constante presença no laboratório do DEC/FCT–UNL e pela partilha constante de conhecimentos e ideias.

Ao Marco Pereira, grande amigo, sempre disponível, obrigado pela ajuda prestada no trabalho efectuado no LNEC.

À Sofia pela paciência e incentivo constante, ajuda em pesquisas, ideias e sugestões.

Aos meus pais, Júlio Marques Massena e Maria da Purificação Marques Massena, e irmãos, Ricardo Marques Massena e Raquel Marques Massena pelo apoio incondicional, compreensão, paciência e incentivo durante a realização deste trabalho, bem como durante todo o meu percurso académico.

À Fanny e ao Kiko, amigos de toda a vida.

RESUMO

Este trabalho é elaborado num momento em que cada vez é mais importante uma correcta identificação de todas as condicionantes relacionadas com a temática da reabilitação de edifícios, considerando que actualmente tal situação assume um carácter público e patrimonial. Pretende-se dar seguimento ao estudo da influência dos ligantes no comportamento das argamassas de cal aérea com ou sem adição de componentes pozolânicos, neste caso o metacaulino.

Entre as várias condicionantes que surgem na reabilitação de edifícios antigos destaca-se a compatibilização de novos materiais com materiais mais antigos, neste caso com o suporte. Esta compatibilização nem sempre é fácil de atingir e não raras vezes as obras de reabilitação resultam no aparecimento de novos problemas. Estes, na maior parte dos casos, conduzem a uma degradação precoce de toda a estrutura envolvente. Torna-se, por isso, necessário que as argamassas de substituição apresentem boa compatibilidade mecânica, física e química com o suporte onde vão ser aplicadas. Entre estas condicionantes encontram-se aspectos relacionados com a construção sustentável, tema que na actualidade assume capital importância.

O presente trabalho compreende uma descrição detalhada de todos os procedimentos de ensaio realizados, que vão desde a produção de cinco tipos diferentes de argamassa de cal aérea com substituição parcial de percentagem de massa de cal por metacaulino e areia, sujeitas a dois tipos de cura distintos em exposição natural. Um tipo de cura em ambiente marítimo e outro em ambiente urbano, respectivamente, na cobertura do edifício IX do Departamento de Engenharia Civil no Monte de Caparica e na estação de exposição natural de revestimentos do LNEC. As argamassas, no seu estado fresco, foram caracterizadas pela consistência por espalhamento. A diferentes idades de cura (28, 60 e 90 dias) foram realizados ensaios de caracterização mecânica, através da determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão, resistência à compressão, de caracterização física, através da determinação da absorção de água por capilaridade, do índice de secagem e da porosidade aberta, e de caracterização química, mineralógica e microestrutural (por MEV, DRX, ATG e porosimetria de mercúrio) que permitiram avaliar as propriedades de cada argamassa. Posteriormente estes resultados foram comparados com outros estudos realizados.

Os ensaios permitiram aferir a vantagem de utilização do metacaulino sobretudo em termos do comportamento das argamassas em condições de exposição natural. Futuros trabalhos de investigação poderão otimizar os métodos de ensaio e o condicionamento dos provetes nas condições de cura a que forem submetidos.

Palavras-chave: Reabilitação de edifícios; argamassas; ligantes; cal aérea; pozolanas; metacaulino; construção sustentável; condição de cura.

ABSTRACT

This work comes at a time that is increasingly important a correct identification of all the constraints that arise on the subject of rehabilitation of buildings, since this type of situation now assumes a public and heritage character. The aim is thus to continue the study of the influence of binders on the behavior of lime mortars with or without the addition of pozzolanic components, in this case metakaolin.

Within the constraints that arise during the rehabilitation of old buildings stands the compatibility with the older material, in this case the support. But this compatibilization is not always easy to achieve, and often rehabilitation works result in the emergence of new problems, some times more severe, leading to premature degradation of the entire surrounding structure. It is necessary that replacement mortars present good mechanical, physical and chemical compatibility with the support on which will be applied. Within these constraints is also sustainable construction, a topic that now assumes an increasingly important character.

This work includes a description of all test performed, ranging from the production of five different types of lime mortar with partial replacement of metakaolin by mass percentage and sand, when subjected to two different natural exposures - one in maritime environment and the other in urban environment, respectively at the rooftop of the Civil Engineering Department building at Monte de Caparica and the natural station of LNEC. Fresh mortars were characterized by flow table consistency. With different curing ages (28, 60 and 90 days) tests were performed for mechanical characterization, in terms of the dynamic modulus of elasticity, flexural and compressive strength determination of hardened mortar, for physical characterization, by determination of water absorption by capillarity, drying tests and open porosity, chemical, mineralogical and microstructural characterization (SEM, XRD, TGA) in order to evaluate the properties of each mortar. Later these results were crossed with other studies.

All tests allowed assessing the advantages and disadvantages of using metakaolin especially in natural exposition of mortar, and future research will optimize the testing procedures as well as packaging the samples in the curing conditions to which they are subjected.

Keywords: Building rehabilitation; mortars; binders; lime; pozzolan; metakaolin; sustainable construction; curing conditions.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE QUADROS.....	VIII
SIMBOLOGIA	IX
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS ADOPTADOS NO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	15
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	46
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA.....	3
1.3. ESTRUTURA / ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1. ECO-EFICIÊNCIA	5
2.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS DE ARGAMASSAS.....	7
2.3. MATÉRIAS PRIMAS DAS ARGAMASSAS COM BASE EM CAL AÉREA	9
2.3.1. CAL AÉREA	9
2.3.2. COMPONENTES POZOLÂNICOS	10
2.3.3.1. Metacaulino	11
2.3.3. AREIAS.....	11
2.4. CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DAS ARGAMASSAS DE CAL AÉREA	12
2.4.1. ENDURECIMENTO DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA	12
2.4.2. APLICAÇÕES DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA.....	12
2.4.3. CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E POZOLANAS	13
2.4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS	13
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS ADOPTADOS NO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	15
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	15
3.1.1. CAL AÉREA	15
3.1.2. METACAUULINO.....	15
3.1.3. AREIAS.....	15
3.2. DETALHES DAS MISTURAS E CONDIÇÕES DE CURA	16
3.3. PLANO DE ENSAIOS.....	19
3.3.1. GENERALIDADES	19
3.3.2. NORMAS EXISTENTES	19
3.3.3. REPRODUÇÃO DO ESTUDO DESENVOLVIDO.....	20
3.3.4. ENSAIOS REALIZADOS	20
3.3.4.1. Descrição geral	20
3.3.5. FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS ESTUDADAS	22
3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS	22
3.4.1. ANÁLISE DA CURVA GRANULOMÉTRICA.....	22
3.4.1.1. Procedimento de ensaio.....	24
3.4.2. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE	24
3.4.2.1. Procedimento de ensaio.....	24
3.5. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	26
3.5.1. PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO	26
3.5.2. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS - CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO	27
3.5.2.1. Cuidados a ter num laboratório.....	28
3.5.3. AMASSADURAS	28
3.5.4. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	29
3.5.4.1. Procedimento de ensaio.....	29
3.5.5. EXECUÇÃO DOS PROVETES	30
3.5.5.1. Moldagem, desmoldagem e cura inicial dos provetes	30
3.5.6. DIFERENÇAS DE PROCEDIMENTOS LNEC / UNL	32
3.6. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO - ENSAIOS REALIZADOS.....	32
3.6.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	33

3.6.1.1. Procedimento de ensaio.....	33
3.6.2. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO	34
3.6.2.1. Procedimento de ensaio.....	34
3.6.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	36
3.6.3.1. Procedimento de ensaio.....	36
3.6.4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	37
3.6.4.1. Procedimento de ensaio.....	38
3.6.5. SECAGEM.....	40
3.6.5.1. Procedimento de ensaio.....	40
3.6.6. POROSIDADE ABERTA	41
3.6.6.1. Procedimento de ensaio.....	42
3.6.7. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL	44
3.6.7.1. Procedimento de ensaio - Preparação das argamassas para DRX, ATG E MEV	44
3.7. ANÁLISE DE DADOS.....	45
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	46
4.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	46
4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO MECÂNICA.....	46
4.1.2. BARIDADE (<i>B_q</i>) DA CAL, METACAULINO E AREIAS	47
4.1.3. MASSA DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	48
4.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	50
4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO	50
4.3. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	53
4.3.1. AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	53
4.3.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	59
4.3.3. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	65
4.3.4. AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	70
4.3.5. AVALIAÇÃO DA SECAGEM.....	74
4.3.6. AVALIAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA.....	78
4.3.7. AVALIAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL.....	79
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	80
5.1. CONCLUSÕES.....	80
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Cal aérea e areia utilizadas.</i>	16
<i>Figura 2 - Exposição em ambiente marítimo (M) e urbano (U), respectivamente.</i>	17
<i>Figura 3 - Equipamento de ensaio para análise granulométrica.</i>	23
<i>Figura 4 - Recipiente preenchido com água.</i>	25
<i>Figura 5 - Esquema de ensaio da baridade (material a ser vertido para o copo); materiais usados no ensaio.</i>	26
<i>Figura 6 - Pesagem dos constituintes; homogeneização dos mesmos e posterior colocação na cuba misturadora mecânica.</i>	28
<i>Figura 7 - Amassadura mecânica dos constituintes; aspecto final.</i>	29
<i>Figura 8 - Mesa de espalhamento da UNL; preenchimento do cone e respectiva compactação; aspecto antes das 'quedas'.</i>	30
<i>Figura 9 - Compactador mecânico; colocação do acréscimo dos moldes.</i>	31
<i>Figura 10 - Compactação mecânica dos moldes.</i>	31
<i>Figura 11 - Aspecto final do molde após compactação mecânica; posterior razeamento com movimento de 'serra'; aspecto final.</i>	31
<i>Figura 12 - Cura inicial, 6 dias em saco de plástico fechado.</i>	32
<i>Figura 13 - Equipamento para ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E) da UNL.</i>	33
<i>Figura 14 - Equipamento de ensaio do IST, prensa de flexão / compressão.</i>	34
<i>Figura 15 - Colocação do provete para ensaio de flexão.</i>	35
<i>Figura 16 - Ensaio de flexão; formação de superfície de rotura.</i>	35
<i>Figura 17 - Ensaio de compressão; formação nítida de rótulas plásticas (mecanismo de rotura).</i>	36
<i>Figura 18 - Início do ensaio de Capilaridade.</i>	39
<i>Figura 19 - Pesagens sucessivas dos provetes de acordo com a norma de ensaio; evolução do ensaio com visível ascensão capilar da água nos provetes.</i>	39
<i>Figura 20 - Ensaio de Secagem.</i>	40
<i>Figura 21 - Ensaio de porosidade aberta; pesagem e colocação da amostra em equipamento de ensaio próprio (exsicador).</i>	43
<i>Figura 22 - Outra perspectiva da "arrumação" dos provetes para ensaio.</i>	43
<i>Figura 23 - Pesagem hidrostática dos provetes.</i>	43
<i>Figura 24 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias.</i>	46
<i>Figura 25 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas.</i>	54
<i>Figura 26 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A.</i>	55
<i>Figura 27 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B.</i>	56
<i>Figura 28 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C.</i>	56
<i>Figura 29 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D.</i>	57
<i>Figura 30 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa E.</i>	57
<i>Figura 31 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura M.</i>	58
<i>Figura 32 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura U.</i>	58
<i>Figura 33 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias de idade das diversas argamassas.</i>	60
<i>Figura 34 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa A.</i>	61
<i>Figura 35 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa B.</i>	62
<i>Figura 36 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa C.</i>	62
<i>Figura 37 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa D.</i>	63
<i>Figura 38 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura M.</i>	63
<i>Figura 39 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura U.</i>	64
<i>Figura 40 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas.</i>	66
<i>Figura 41 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A.</i>	67

<i>Figura 42 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B.</i>	67
<i>Figura 43 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C.</i>	67
<i>Figura 44 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D.</i>	68
<i>Figura 45 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa E.</i>	68
<i>Figura 46 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura M.</i>	69
<i>Figura 47 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura U.</i>	69
<i>Figura 48 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa A.</i>	70
<i>Figura 49 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa B.</i>	71
<i>Figura 50 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa C.</i>	71
<i>Figura 51 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa D.</i>	72
<i>Figura 52 - Curvas de absorção de água por capilaridade média aos 28 dias de todas as argamassas.</i>	73
<i>Figura 53 - Pormenor da absorção de água por capilaridade média inicial de todas as argamassas.</i>	73
<i>Figura 54 - Absorção e água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de idade.</i>	74
<i>Figura 55 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa A.</i>	75
<i>Figura 56 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa B.</i>	76
<i>Figura 57 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa C.</i>	76
<i>Figura 58 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa D.</i>	76
<i>Figura 59 - Curvas de secagem aos 28 dias de todas as argamassas.</i>	77
<i>Figura 60 - Índice de secagem aos 28 dias de todas as argamassas.</i>	77
<i>Figura 61 - Porosidade aberta das argamassas diversificadas aos 28 dias de idade.</i>	79

ÍNDICE DE QUADROS

<i>Quadro 1 - Características das argamassas de cal aérea com adições pozolânicas.</i>	13
<i>Quadro 2 - Composição das argamassas estudadas.</i>	17
<i>Quadro 3 - Tipo das argamassas, cura e n.º do provete.</i>	18
<i>Quadro 4 - Ensaio efectuados.</i>	21
<i>Quadro 5 – Massa de cada material utilizada na amassadura – quantidades para 6 provetes [LNEC].</i>	22
<i>Quadro 6 - Séries de peneiros utilizados para análise granulométrica respectivamente das areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30/mistura de areias.</i>	23
<i>Quadro 7 - Módulo de finura dos agregados.</i>	47
<i>Quadro 8 - Baridade dos constituintes das argamassas.</i>	48
<i>Quadro 9 - Quantidade das matérias primas utilizadas nas amassaduras [LNEC].</i>	49
<i>Quadro 10 - Quantidade das matérias primas utilizadas nas amassaduras [UNL].</i>	49
<i>Quadro 11 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras [LNEC].</i>	50
<i>Quadro 12 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras [UNL].</i>	51
<i>Quadro 13 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras por dia/sessão de trabalho [LNEC].</i>	52
<i>Quadro 14 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras por dia/sessão de trabalho [UNL].</i>	52
<i>Quadro 15 - Espalhamento médio obtido nas argamassas por dia/sessão de trabalho [LNEC].</i>	52
<i>Quadro 16 - Espalhamento médio obtido nas argamassas por dia/sessão de trabalho [UNL].</i>	52
<i>Quadro 17 - Módulo de elasticidade dinâmico E aos 28, 60 e 90 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.</i>	54
<i>Quadro 18 – Resistência à tracção por flexão (R_t) aos 28 e 90 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.</i>	60
<i>Quadro 19 – Resistência à tracção por flexão (R_c) aos 28, 60 e 90 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.</i>	65
<i>Quadro 20 - Valor assintótico e coeficiente de capilaridade aos 28 dias de idade das argamassas.</i>	74
<i>Quadro 21 - Valor do índice de secagem e respectivo desvio padrão das argamassas.</i>	77
<i>Quadro 22 - Porosidade aberta aos 28 dias de idade.</i>	78

SIMBOLOGIA

SIMBOLOGIA DE MATERIAIS

L – Cal aérea hidratada em pó da Lusical CL90

Mk – Metacaulino Argical M 1200 S

S – Mistura de areias AREIPOR

- APAS 12 – areia grossa
- APAS 20 – areias intermédia
- APAS 30 – areia fina

SIMBOLOGIA DE ARGAMASSAS

A – Argamassa de referência, sem Mk, ao traço volumétrico 1:3

B – Argamassa com 10% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, ao traço volumétrico 1:3

C – Argamassa com 20% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, ao traço volumétrico 1:3

D – Argamassa com 30% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, ao traço volumétrico 1:3

E – Argamassa com 50% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, ao traço volumétrico 1:3

SIMBOLOGIA DAS CONDIÇÕES DE CURA DAS ARGAMASSAS

U – Exposição Urbana na estação natural do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do LNEC

M – Exposição Marítima na estação natural em ambiente perto do mar localizada na cobertura plana do Edifício IX do Campus de Caparica da UNL

SIMBOLOGIA DE ENSAIOS E DETERMINAÇÕES

E – módulo de elasticidade dinâmico

CC – coeficiente de absorção de água por capilaridade

R_t – resistência à tracção por flexão em três pontos

R_c – resistência à compressão

P_a – porosidade aberta

Esp – consistência por espalhamento

IS – índice de secagem

V_v – volume de vazios

VA – valor assintótico da absorção de água por capilaridade

SIGLAS DE ENTIDADES E DOCUMENTOS NORMATIVOS

LNec – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

DEC/FCT-UNL – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

ESTBarreiro/IPS – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal

IST/UTL – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEN – European Committee for Standardization

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – International Organization of Standardization

NRI – Núcleo de Revestimentos e Isolamentos

MEV – Microscópio Electrónico de Varrimento

DRX – Difracção de Raio X

ATG – Análise Térmica Gravimétrica

1. INTRODUÇÃO

É importante referir que existe uma elevada dificuldade em termos de reprodutibilidade do estudo realizado.

Este trabalho pretendeu estudar os efeitos de condições climáticas de dois ambientes em exposição natural distintos nas propriedades de diferentes argamassas, uma vez que estas condições não são controláveis, variam de dia para dia e é impossível garantir o mesmo ambiente de estudo para trabalhos futuros.

1.1. ENQUADRAMENTO

Grande parte dos edifícios em Portugal foram construídos há mais de 50 anos e muitos encontram-se em avançado estado de degradação devido à falta de manutenção regular (AGOSTINHO, 2008).

Ao longo das últimas décadas tem-se verificado que a intervenção em revestimentos exteriores, com a alteração de materiais e de processos construtivos, nem sempre tem contribuído para melhorar o estado de conservação dos edifícios antigos. Pelo contrário, muitas vezes acelera o mecanismo de degradação (VELOSA, 2007).

Os sinais de degradação manifestam-se com frequência ao nível dos revestimentos de paredes, correspondendo a sua reparação, habitualmente, a uma parcela significativa das obras de conservação e reabilitação de edifícios antigos (MARGALHA, et al., 2007).

A substituição de argamassas de cal originais por argamassas de cimento em edifícios antigos correntes e em monumentos históricos veio revelar os problemas introduzidos por este material.

Na reparação de edifícios antigos deve procurar manter-se a forma como o edifício absorve e evapora a água no estado líquido e de vapor, o que geralmente é possível com argamassas à base de cal aérea. Como constatou Agostinho (AGOSTINHO, 2008), existe uma elevada dificuldade em reproduzir técnicas de aplicação utilizadas no passado. A compatibilização de materiais fica seriamente afectada sendo necessário aperfeiçoar o conhecimento científico neste domínio de forma a que novos materiais aplicados possam apresentar um correcto desempenho, sem comprometer a sua utilização, e sejam compatíveis com os materiais já existentes cumprindo as funções que lhes são exigidas.

O surgimento do cimento Portland foi o responsável pelo desuso das argamassas de cal (ALVAREZ, et al., 2007), (MEHTA, et al., 2001), (FARIA, et al., 2011), (TORGAL, et al., 2008). Com os ritmos actuais das obras de construção é fácil de constatar que o aparecimento de um ligante (cimento Portland) que permite abreviar o tempo de presa e obter resistências mecânicas mais elevadas fez com que as construções passassem a ser executadas de uma forma mais célere. Com a

utilização corrente do cimento Portland e, em menor teor, da cal hidráulica, as argamassas de cal praticamente deixaram de ser utilizadas.

Com o passar do tempo, experiências e conhecimentos adquiridos vieram a demonstrar que as argamassas constituídas só com base em cimento Portland se revelam inadequadas para a reabilitação e conservação de edifícios históricos.

Este tipo de argamassas revela, do ponto de vista de utilização em suportes antigos (edifícios históricos), uma elevada incompatibilidade, uma vez que durante o seu processo de endurecimento libertam sais solúveis, apresentam resistências mecânicas demasiado elevadas, dificultam a secagem da humidade e não são tão deformáveis (BOTAS, 2009), provocando uma rápida deterioração do suporte e o aparecimento de novas patologias.

Vários estudos têm revelado que as argamassas de cal aérea são as que apresentam maior adequabilidade e compatibilidade na execução de revestimentos para edifícios antigos, quer em termos de resistência, quer de deformabilidade gerada pela boa interacção entre os materiais e soluções construtivas existentes (CAVACO, 2005). É pois, crucial definir as exigências principais e as características que as argamassas de substituição devem apresentar.

As argamassas de cal como apresentam uma preparação, aplicação e endurecimento mais demorados foram vítimas da tecnologia da construção, a sua utilização foi caindo no esquecimento e a sua experiência de aplicação foi-se perdendo durante décadas (FARIA, 2004). Com base nos problemas surgidos com as argamassas hidráulicas têm vindo a ser investigadas e lentamente reintroduzidas na construção e especialmente na reabilitação e conservação.

A utilização de pozolanas nas argamassas começou no passado quando foram descobertos benefícios nas suas propriedades. As pozolanas são materiais finos ricos em silicatos e aluminatos na forma amorfa que podem combinar-se com a cal aérea nas argamassas, conferindo às mesmas propriedades hidráulicas e um aumento da sua durabilidade mantendo a compatibilização com materiais mais antigos (CHAROLA, et al., 2005), (FARIA, 2009). A razão do uso, principalmente, de metacaulino para produzir geopolímeros deve-se ao facto deste poder ser obtido de forma natural e em grande escala. O metacaulino é considerado “amigo do ambiente”, uma vez que comparado com o cimento Portland pode ser obtido a temperaturas muito mais baixas e liberta cerca de 80-90 % menos de CO₂ para a atmosfera (ROVNANÍK, 2010). É ainda um material cuja matéria-prima (caulino) existe em abundância em Portugal, apresentando portanto um bom potencial de produção no País.

O presente estudo pretende contribuir para o incremento do conhecimento do comportamento das argamassas de cal aérea com ou sem adições pozolânicas (metacaulino), em dois locais de exposição ambiental, através da caracterização mecânica, física, química, mineralógica e microestrutural, realizada a várias idades jovens.

A caracterização das argamassas a várias idades (28, 60 e 90 dias) foi efectuada com o objectivo de estudar a evolução das suas propriedades ao longo do tempo, dado que este aspecto

assume um interesse particular para as argamassas de cal aérea, particularmente com metacaulino, e que deverá ser considerado na definição dos ritmos de obra.

1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

Esta dissertação tem como objectivo o estudo da evolução de cinco formulações de argamassas de cal aérea, com e sem substituição parcial da cal por um aditivo pozolânico (metacaulino) e avaliar a influência das condições de cura nas suas características por recurso a técnicas de avaliação das características mecânicas. A introdução de uma pozolana visa conferir propriedades resistentes que uma argamassa só de cal não possui. Por outro lado, esta mesma pozolana sujeita a condições de cura diferentes e utilizada em quantidades variáveis irá permitir descobrir qual a sua adequabilidade, vantagens de utilização e usos específicos em determinadas situações. Estas características encontram-se descritas no Quadro 1 da página 13, podendo destacar-se, entre outras, a carbonatação absorvendo CO₂, o aumento da resistência mecânica, mais rápido endurecimento e o aumento da durabilidade face a sais solúveis.

Para tal segue-se a seguinte metodologia:

Realizar argamassas com traço volumétrico 1:3 ligante : agregado , com substituições crescentes de cal aérea por metacaulino (uma pozolana artificial), produzir provetes a submeter a curas em ambientes diferentes e proceder à sua caracterização - essencialmente mecânica e física - a idades distintas.

As formulações estudadas foram objecto de caracterização no estado fresco e endurecido. A caracterização no estado fresco foi obtida através da determinação da consistência por espalhamento, da massa volúmica e da estimativa do volume de vazios.

A caracterização no estado endurecido foi efectuada em diferentes fases de caracterização das argamassas (idades: 28, 60 e 90 dias). A caracterização mecânica consistiu na avaliação da resistência mecânica à compressão e flexão e na determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

A caracterização física das argamassas foi obtida através da avaliação da absorção de água por capilaridade, da secagem e porosidade aberta.

Através da análise dos resultados obtidos, avaliar a evolução das características das argamassas com diferentes teores de metacaulino com a idade e as condições de cura (inserido no âmbito do projecto **FCT METACAL**).

Finalmente cruzar os resultados obtidos decorrentes de proporções de misturas de constituintes diferentes e condições de cura distintas com estudos já realizados e tentar perceber qual a proporção de cal : metacaulino que oferece melhores características.

1.3. ESTRUTURA / ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, sendo o primeiro um capítulo introdutório do qual fazem parte um enquadramento geral sobre argamassas e reabilitação, os objectivos/métodos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se o estado da arte, com descrição dos temas da eco-eficiência, argamassas e matérias-primas. Assuntos centrais à volta dos quais se desenvolve todo o trabalho efectuado.

No terceiro capítulo é descrito todo o programa experimental através da indicação dos materiais utilizados e dos detalhes das misturas de argamassas que são alvo de estudo na presente dissertação. Neste capítulo ainda são explicados de forma detalhada todos os procedimentos experimentais dos ensaios efectuados de forma a puderem ser reproduzidos.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos. Posteriormente é feita uma análise detalhada desses mesmos resultados, através de uma comparação com outros estudos realizados.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões do estudo realizado e algumas sugestões e propostas para desenvolvimentos futuros.

As referências bibliográficas são apresentadas em capítulo autónomo final.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. ECO-EFICIÊNCIA

Actualmente as preocupações ambientais são cada vez mais consideradas. É notório o esforço de todos os intervenientes para que a indústria da construção seja “eco-friendly”, reduzindo-se o seu impacto no ambiente, que actualmente é muito elevado.

Presentemente, o sector da construção enfrenta o desafio de construir de forma ecologicamente mais sustentável (MALHOTRA, 1999).

Algumas construções históricas com mais de 2000 anos, como o Panteão de Roma e vários aquedutos em toda a Europa, construídos com base num endurecimento lento de betões feitos à base de cal e pozolanas estão, ainda hoje, em condições excelentes, enquanto estruturas de betão armado do século XX apresentam inúmeros sinais de degradação acentuada (MEHTA, et al., 2001).

Alguns investigadores (BURROWS, 1998), (JACKSON, 1946), concluíram que a origem do problema esteve na transição de um betão que passou a apresentar fendas em detrimento da habitual degradação. Julga-se que esta mudança tenha ocorrido quando a hidratação do betão se tornou num processo mais rápido.

A indústria da construção constitui um dos maiores e mais activos sectores económicos em toda a Europa. Em termos ambientais esta indústria é, no entanto, responsável por 30% das emissões de carbono, consumindo mais matérias-primas do que qualquer outra actividade económica. Consome também elevadas quantidades de energia e os resíduos de construção e demolição (RCD) representam além disso a grande maioria dos resíduos produzidos em toda a Europa. Contudo, grande parte desses resíduos têm a vantagem de poder ser reciclados (TORGAL, et al., 2008).

A solução pode passar pela produção de materiais a partir de resíduos, com elevado nível de reciclagem, mais duráveis, que incorporem menos energia ou que sejam escolhidos mediante uma análise do seu ciclo de vida.

De acordo com alguns investigadores, a forma mais eficiente para a indústria da construção se tornar uma actividade sustentável passa pela incorporação de resíduos de outras indústrias em materiais de construção (TORGAL, et al., 2008), (MALHOTRA, 1978).

Estudos recentes conduzidos pelo IST estimaram que os resíduos de RCD produzidos durante 2004, em parte podiam ser reaproveitados mas dos quais 95% tiveram como destino a deposição em aterro. A título de exemplo a taxa média de reciclagem de RCD na média Europeia é de 50%, enquanto que na Dinamarca esta mesma taxa é de cerca de 89% (TORGAL, et al., 2008).

Materiais ligantes com baixas emissões de carbono, materiais mais duráveis, que permitam o reaproveitamento de resíduos, materiais recicláveis ou obtidos a partir de fontes renováveis, materiais com baixa energia incorporada ou não tóxicos e que não contaminem o ar no interior das habitações,

constituem exemplos daquilo que podem ser as diversas variantes que enquadram a eco-eficiência dos materiais de construção (TORGAL, et al., 2008).

As investigações sobre ligantes alternativos ao cimento Portland com menores emissões de dióxido de carbono merecem, desde há algumas décadas a esta parte, uma particular atenção por parte da comunidade científica.

Como é sabido a produção de clínquer de cimento, está associada a um elevado nível de emissões poluentes.

As condicionantes associadas ao desenvolvimento sustentável levaram já ao aparecimento de betões de cariz eco-eficiente, cuja composição passa pela incorporação de subprodutos industriais como as escórias de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas de fumo e o metacaulino (MEHTA, 2001).

Segundo Mehta (MEHTA, 1991) por cada tonelada de clínquer de cimento, vão libertar-se para a atmosfera 579 kg de CO₂ e isto independentemente da eficiência do processo utilizado. A este valor, é ainda necessário somar aproximadamente 390 kg de CO₂, devidos à utilização de combustíveis fósseis consumidos durante a produção do clínquer.

Simplificadamente pode por isso afirmar-se que durante a produção de 1 tonelada de clínquer de cimento se produz quase 1 tonelada de CO₂. Além disso, como as projecções existentes apontam para que o consumo mundial de cimento Portland possa duplicar nos próximos 40 anos, tal facto agravará de modo substancial os efeitos negativos das referidas emissões (TORGAL, et al., 2008).

Como forma de minimizar este problema várias investigações sobre o desenvolvimento de ligantes alternativos ao cimento Portland apontam para o facto dos ligantes geopoliméricos estarem associados a baixas emissões de CO₂. Em adição, estes ligantes apresentam durabilidades superiores às do próprio cimento Portland (MEHTA, 2001), (SAMPAIO, et al.), (WILD, et al., 1996), (KHATIB, et al., 2003).

O maior problema dos intervenientes em obras de construção está relacionado com a durabilidade e compatibilização dos materiais. É incontroverso que as verbas envolvidas quer em obras de raiz (novas), quer em obras de reabilitação, são muito significativas. Logo interessa uma conjugação de factores que possibilite um ganho para todas as partes envolvidas num projecto de construção. Essa conjugação de factores pode passar por uma combinação de novos materiais, ou até de matérias já existentes, ou em combinação com novas matérias ou substâncias que aumentem a sua resistência e durabilidade. Quanto maior for a durabilidade de um material, maior será a sua vida útil e, conseqüentemente, menor será o seu impacto ambiental (GONZÁLEZ, et al., 2006).

Também a redução dos padrões energéticos actuais através da redução dos níveis de concentração de CO₂ na atmosfera resolve quer um problema económico, quer um problema ambiental (HERZOG, 2001).

A escolha adequada dos materiais de construção pode assim contribuir de forma decisiva para a redução da quantidade de energia necessária na construção de edifícios (TORGAL, et al., 2008).

O que se deveria utilizar correntemente são materiais ligantes com baixas emissões de carbono, materiais com maior durabilidade, recicláveis, obtidos através de fontes renováveis, materiais de baixa energia e não tóxica. Este seria um exemplo daquilo que poderia ser a procura de uma indústria da construção sustentável.

Assim, a sustentabilidade da indústria da construção em geral e a eco-eficiência dos materiais de construção em particular assumem um papel primordial cujo estudo importa aprofundar e divulgar (SAMPALHO, et al.).

Ao compararmos a produção de cimento de Portland com o metacaulino verificamos que o Mk necessita de muito menos calor de hidratação e que emite cerca de 80-90 % menos de emissões de CO₂ do que o cimento Portland, este é um exemplo simples de como pequenas alterações podem fazer muito por um futuro diferente (DAVIDOVITS, 1994).

2.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS DE ARGAMASSAS

A argamassa é um material compósito que resulta da mistura homogênea de agregados finos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adjuvantes, com propriedades várias melhorando desta forma o seu desempenho e pode ser doseada em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas ou pré-doseadas).

Os ligantes mais utilizados na constituição das argamassas são a cal aérea ou hidráulica, o gesso e o cimento. Por seu turno, as areias são os agregados mais utilizados.

As funções desempenhadas pelas argamassas vão do acabamento estético, ao dificultar a infiltração de água, passando pela união dos componentes da alvenaria, por regularizar a absorção, corrigir imperfeições da base e melhorar a aderência até um possível acabamento final (SILVA, 2008).

Quando se trata de intervencionar ou reabilitar um edifício antigo em primeiro lugar há que considerar a possibilidade de conservação dos revestimentos existentes, recorrendo, caso seja necessário, a reparações pontuais. Pode contudo, caso o valor patrimonial do edifício o justifique, recorrer-se a operações de consolidação.

Nos edifícios antigos muitas vezes é necessário substituir as argamassas existentes ou porque estas já não desempenham as funções para que são destinadas da melhor forma, devido à deterioração ocorrida ou porque muitas vezes já não existem mesmo. Nestes casos, em que é necessário substituir parcial ou totalmente as argamassas antigas, ou mesmo repor a argamassa em falta, é fundamental escolher argamassas adequadas que funcionem de acordo com o uso específico para que foram destinadas as anteriores. A compatibilização com as argamassas existentes e com os suportes antigos assume um papel fundamental.

Tal não se afigura fácil, especialmente quando se fala em edifícios muito antigos e com superfícies muito degradadas.

Para o efeito é necessária a realização de estudos que verifiquem determinados requisitos funcionais e estéticos. Contudo estes estudos são muitas vezes descartados e a opção pela escolha da argamassa faz-se sem qualquer rigor científico, desconhecendo-se muitas vezes as características da própria argamassa seleccionada assim como o quadro de exigências a cumprir (VEIGA, 2003).

O tipo de argamassa a usar deve ser adaptado a cada situação e é importante que não se tente generalizar um determinado campo de aplicação pois se por vezes as condicionantes parecem as mesmas, basta uma ligeira diferença para alterar o tipo de argamassa mais indicado para o efeito pretendido.

Para cada situação deve, por isso, ter-se em conta um determinado conjunto de factores tais como as características do suporte, o tipo de edifício e a respectiva época de construção, assim como o clima da região e as condições ambientais a que está sujeito. Estudos realizados no LNEC permitiram definir parâmetros e estabelecer limites que se considera garantirem, de um modo geral, um comportamento adequado para os suportes mais correntes, desde que sejam cumpridas as boas regras de aplicação (VEIGA, 2003).

Estudos desenvolvidos por diversos autores (VEIGA, 2003), (FARIA, et al., 2004) no campo das argamassas permitiram caracterizar e comparar diversos tipos de argamassas.

No que respeita a aspectos de compatibilização é importante referir que algumas argamassas têm inconvenientes bem conhecidos.

As argamassas de cimento possuem um aspecto final muito diferente das argamassas antigas, nomeadamente em termos da textura da superfície e do modo como reflectem a luz. Outro factor importante é o facto das argamassas de cimento apresentarem na sua composição sais solúveis que ao serem transportados para o interior das paredes vão mais tarde dar origem a fenómenos de cristalização, contribuindo desta forma para a degradação precoce da argamassa. Adicionalmente, este tipo de argamassas tem uma capacidade limitada de permitir a secagem da parede que requer a introdução de dióxido de carbono no interior da argamassa e uma capacidade limitada de deformação traduzindo-se numa certa aptidão para a ocorrência de fendilhação (CHAROLA, et al., 1999).

As argamassas de cal aérea, uma vez que são as que apresentam uma composição mais próxima das argamassas antigas, são as mais capazes de possuir uma compatibilização correcta em termos de exigências funcionais. Porém, também estas apresentam problemas quando sujeitas a condições adversas de chuva, a ciclos de gelo-degelo e aplicações em ambientes muito húmidos.

Outros tipos de argamassas designadas de intermédias encontram-se entre as duas primeiras (argamassas de cimento e argamassas de cal aérea), e procuram melhorar algumas características de uma sem incorporar muitos dos inconvenientes da outra. Finalmente as

argamassas pré-doseadas apresentam composições muito diversas sendo necessário um estudo individual que implica serem avaliadas caso a caso.

Para finalizar, é necessário enfatizar que nem sempre um determinado material, só pelas excelentes características rotuladas e muitas vezes conhecidas, desempenha um bom trabalho quando utilizado. Quer isto dizer que não se pode esperar que uma argamassa só por ser “boa”, irá servir para qualquer situação.

Com efeito, tal não acontece e é necessário ter em conta um determinado conjunto de factores que vão desde as características do suporte, a qualidade do revestimento, durabilidade, condições climáticas, de cura, de preparação e a compatibilidade de materiais. É fundamental que novos materiais e materiais mais antigos trabalhem em harmonia, o que significa que as características de um não podem, ou não devem, superiorizar-se às do outro sob pena da suposta solução resultar num problema ainda maior (VEIGA, 2003).

2.3. MATÉRIAS PRIMAS DAS ARGAMASSAS COM BASE EM CAL AÉREA

2.3.1. CAL AÉREA

Um dos ligantes artificiais mais antigos é o ligante que resulta da cozedura dos calcários, constituídos sobretudo por CaCO_3 , muito abundantes na natureza. Podem obter-se dois tipos de calcário, um quase puro quando o carbonato de cálcio existe numa concentração de quase 100%, e outro o, calcário margoso, quando a percentagem de argila é elevada (VELOSA, 2007).

Os dois tipos de cal são apresentados de seguida, realçando as diferenças relativamente ao teor de impurezas e temperaturas de obtenção:

- Cal aérea - cozedura CaCO_3 (< 5% impurezas) a 800/900°C
- Cal hidráulica - cozedura CaCO_3 (8 - 20% impurezas) a 1000/1100°C

A cozedura do calcário puro dá origem ao óxido de cálcio, que constitui a cal aérea, enquanto que a cozedura do calcário margoso dá origem às cals mais ou menos hidráulicas, conforme o teor de argila. Este primeiro processo, designado por calcinação, compreende a cozedura entre os 800 a 900°C com uma libertação posterior de dióxido de carbono para a atmosfera e resultando no produto final em óxido de cálcio (CaO), vulgarmente conhecido por cal viva (COUTINHO, 2002).

Até à entrada em vigor da versão de 2001 da norma EN 459-1 (CEN, 2010) as cals aéreas dividiam-se em gordas e magras consoante o teor de impurezas. As cals aéreas gordas derivam de calcários quase puros com teores não inferiores a 99% e são brancas. As cals aéreas magras (acinzentadas) derivam de calcários com teores de argila e de outras impurezas compreendidos entre 1 e 5% (COUTINHO, 2002). Chamam-se gordas às primeiras devido às suas propriedades plásticas e facilmente trabalháveis. As cals magras não são tão fáceis de trabalhar. A reacção de presa, é idêntica para ambas as cals (COUTINHO, 2002).

A cal aérea pode ser cálcica quando é sobretudo constituída por óxido de cálcio (CaO), ou dolomítica quando constituída sobretudo por óxido de cálcio e óxido de magnésio.

O produto obtido pela cozedura dos calcários designa-se por cal viva (*quicklime*) que é sobretudo óxido de cálcio e que por reacção com a água (extinção) fornece a cal apagada ou extinta (*hydrated lime*).

Para obtenção e posterior aplicação do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , é necessário proceder à hidratação da cal viva. Esta operação chama-se extinção da cal e pode ser obtida por dois processos designados de imersão ou por aspersão. Pode resultar uma cal hidratada em pó ou em pasta.

A cal comercializada pode ser de diferentes tipos de acordo com o seu fornecimento. Existem cais fornecidas em saco, a granel ou ainda em recipientes apropriados como são o caso das cais aéreas em pasta.

2.3.2. COMPONENTES POZOLÂNICOS

No contexto das argamassas podemos definir pozolanas como materiais siliciosos ou sílico-aluminosos, naturais ou artificiais, que contêm um elevado teor de sílica (SiO_2) e de alumina (Al_2O_3) na forma reactiva, isto é, numa qualquer forma não cristalina (amorfa), que por si só não hidratam em contacto com a água mas que finamente divididos e na presença de humidade reagirão quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas vulgares formando compostos com propriedades hidráulicas (AMBROISE, et al., 1994), (FARIA, 2004).

As primeiras utilizações bem documentadas das pozolanas datam dos tempos do Império Romano quando se descobriu que as cinzas vulcânicas, quando finamente trituradas e misturadas com cal, produziam uma argamassa resistente e duradoura. Rapidamente as explorações foram alargadas a outras zonas e mais tarde a toda a bacia mediterrânica, e a utilização de pozolanas foi alargada a produtos artificiais (onde as pozolanas naturais não existiam) fazendo-se uso das diversas colorações do material, variáveis conforme a sua origem. Vitruvius, Engenheiro e Arquitecto romano, que viveu no século I a.C., já descrevia quatro tipos de pozolana (negra, branca, cinzenta, e vermelha) e os seus usos.

Embora a designação se tenha alargado a materiais produzidos industrialmente, ou derivados de cinzas de processos de queima (pozolanas artificiais), na sua origem as pozolanas são rochas de origem vulcânica (pozolanas naturais), constituídas por uma mistura mais ou menos homogénea de materiais argilosos, siltes e areias, com maior ou menor agregação, resultantes da alteração pelos agentes atmosféricos de materiais vulcânicos ricos em sílica não cristalina, com destaque para a pedra-pomes.

As pozolanas naturais são constituídas por rochas que só por si têm propriedades pozolânicas, não tendo necessidade de qualquer tratamento especial, a não ser a extracção e moagem. São de origem vulcânica ou sedimentar e encontram-se na natureza, sendo provenientes do rápido arrefecimento de produtos de erupções vulcânicas ou sob a forma de terra diatomácea (VELOSA, 2007).

As pozolanas artificiais resultam de processos de queima a temperaturas específicas e de eventual moagem de materiais naturais ou resultantes de subprodutos industriais.

As cinzas volantes são a pozolana artificial mais comum, muito utilizada em cimentos pozolânicos e betões. São recolhidas pelos despoeiradores de centrais termoeléctricas e resultam da queima de carvão mineral. Após moagem, as partículas das cinzas volantes adquirem superfície específica semelhante à dos ligantes e a sílica nelas contida fica facilmente disponível para reacção. A adição de cinzas volantes ao cimento tipo Portland resulta numa mistura de boa qualidade e com um preço reduzido, já que as cinzas são em geral mais baratas que o cimento que substituem (FARIA, 2004). Contudo actualmente não abundam em Portugal.

2.3.3.1. Metacaulino

O metacaulino é uma pozolana artificial obtida pela calcinação de caulino a temperaturas geralmente entre 600-900°C e posterior moagem. Constitui uma fase de transição pouco cristalizada. O tratamento térmico para obtenção da fase de transição pouco cristalizada e a moagem por forma a obter uma área superficial específica elevada, conferem elevada pozolanicidade à pozolana (AMBROISE, et al., 1994), (FARIA, 2004).

A reactividade pozolânica de um metacaulino depende da cristalinidade de origem, da superfície específica, da granulometria e do grau de amorfização. Todos estes aspectos podem ser trabalhados de forma a se conseguir tirar o máximo partido da sua utilização (SAMPAIO, et al.).

Martin-Calle (MARTIN-CALLE, 1989) refere a importância dos diferentes ligantes cimento/metacaulino, demonstrando através de estudos realizados que a eficácia pode variar consoante o tipo de ligante e que para isso questões como a granulometria e a estrutura porosa influenciam directamente uma melhoria da durabilidade do conjunto.

2.3.3. AREIAS

A pasta de cal ou de outros ligantes ao secar retrai e fissa. Para reduzir a retracção de secagem emprega-se areia nas argamassas. As areias são materiais granulados finos que são aglomerados por um ou mais ligantes, constituindo o esqueleto das argamassas (FARIA, 2004), (RATO, 2006).

A areia proporciona o arejamento da argamassa permitindo no caso das argamassas de cal aérea a sua carbonatação e endurecimento.

As areias mais utilizadas em Portugal provêm de rio, de areeiro ou são resultantes da fragmentação de rochas. A areia utilizada deve ser siliciosa ou calcária, bem limpa, isenta de matérias húmidas e de elevados teores de argila.

A adição de areias às argamassas influencia directamente a sua trabalhabilidade no estado fresco, e mais tarde a resistência mecânica no estado endurecido.

Diversos factores tais como dureza, forma dos grãos, granulometria e porosidade das areias afectam as características das argamassas. A origem e o estado de limpeza da areia são também factores que podem alterar as características de uma argamassa.

Considera-se adequada e bem graduada uma areia com menor volume de vazios. Por outro lado, areias com maior volume de vazios afectam a estrutura porosa da argamassa, sendo desta forma necessários traços mais ricos em ligante.

Todavia, o aumento da quantidade de cal aérea numa argamassa pode ter consequências negativas ao nível da retracção (MARGALHA, et al., 2007).

2.4. CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DAS ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

2.4.1. ENDURECIMENTO DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

O processo de endurecimento faz-se por recarbonatação ao ar. Neste tipo de cais a secagem é acompanhada por retracção da massa e consequente fissuração, torna-se por isso conveniente o uso de areias nas argamassas à base de cal aérea (COUTINHO, 2002).

Depois de aplicadas as argamassas de cal aérea endurecem em duas fases. Numa primeira fase, designada por presa inicial, dá-se a evaporação da humidade em excesso.

Na segunda fase, a que se dá o nome de carbonatação, ocorre um endurecimento da sua estrutura por carbonatação, ou seja, pela conversão do hidróxido de cálcio (cal apagada) em carbonato de cálcio, por reacção com o dióxido de carbono da atmosfera (COUTINHO, 2002).

A velocidade desta fase depende da temperatura, da humidade e da estrutura porosa da argamassa, podendo levar anos a completar-se.

2.4.2. APLICAÇÕES DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

Considerando as propriedades do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , constata-se que o mesmo é solúvel na água doce mas mais ainda em água salgada. Daí que além da cal aérea não endurecer nem ganhar presa em contacto directo com a água, esta argamassa é ainda mais solúvel em água salgada, pelo que o seu uso é vivamente desaconselhado quer para obras marítimas, quer para obras hidráulicas ou mesmo em obras nas imediações destes locais.

Tirando a situação acima descrita, este tipo de cais é vulgarmente utilizado para o fabrico de estuques, para argamassas de reboco ou na típica caiação.

Como já foi referido anteriormente as argamassas de cal aérea são as que apresentam maior e melhor compatibilidade com as alvenarias antigas. Contudo, como endurecem exclusivamente por reacções de carbonatação, a sua utilização em ambientes com fraca presença de dióxido de carbono ou com presença elevada de água pode estar fortemente condicionada. A fim de contornar esta situação é possível utilizar aditivos pozolânicos que conferem às argamassas características hidráulicas, possibilitando a ocorrência de presa também por reacções de hidratação (MARTINS, 2010).

2.4.3. CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E POZOLANAS

As características das argamassas de cal aérea podem ser bastante melhoradas com a adição de pozolanas. De entre as muitas características que se podem evidenciar destacam-se as que se encontram no Quadro 1.

Quadro 1 - Características das argamassas de cal aérea com adições pozolânicas (SILVA, 2008).

Argamassas de cal aérea e pozolanas
Carbonatação absorvendo CO ₂ do ar
Capacidade de endurecimento debaixo de água
Aumento da resistência mecânica
Manutenção de baixo módulo de elasticidade e da capacidade de deformação
Mais rápido endurecimento
Manutenção da permeabilidade ao vapor de água
Aumento da durabilidade face a sais solúveis

A adição de pozolanas às argamassas permite melhorar um conjunto de características diversas que serão de seguida descritas.

Entre as diversas características destacam-se a possibilidade de aplicações em ambientes marítimos e em locais onde o dióxido de carbono tem dificuldades em chegar. Permite aplicações de camadas de reboco com maior espessura, melhoria da trabalhabilidade com diminuição da segregação no estado fresco, confere aumentos da resistência mecânica, sobretudo a longo prazo, economia que se obtém quando se procede à substituição de uma parte de ligante por uma parte de pozolana, comportamentos melhorados face ao contacto com a água e de um modo geral maior durabilidade às argamassas (COUTINHO, 1963).

Mais recentemente assiste-se na indústria da construção a um interesse crescente no uso de uma pozolana altamente reactiva como é o caso do metacaulino. A comercialização do metacaulino já existe em alguns países e o que no princípio era visto com desconfiança é presentemente cada vez mais utilizado e as suas vantagens mais exploradas (DING, et al., 2002). Actualmente em Portugal apenas existe uma fábrica que comercializa metacaulino, contudo a sua produção ainda se encontra em fase de optimização.

Importa referir que para tudo existe uma condição ideal, o uso de maiores quantidades de pozolanas em argamassas à base de cal aérea não implica necessariamente melhores argamassas. Esta constatação será alvo de estudo nesta dissertação, considerando que com a análise dos resultados obtidos para os diferentes tipos de argamassa, com diferentes condições de cura, se pretende avaliar qual a percentagem ideal de metacaulino em substituição parcial de ligante.

2.4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS

A caracterização das matérias-primas é dos aspectos mais relevantes.

No caso das areias a sua curva granulométrica influencia as características das argamassas, nomeadamente resistência e trabalhabilidade. Em face disso, pretende-se uma granulometria adequada, de forma a obter argamassas mais compactas, com menor dosagem de ligante. Desta forma reduz-se o risco de ocorrência de fenómenos de segregação - *“separação física de matérias*

primas na massa em mistura, devido às diferenças de peso unitário dos grãos dos componentes, formando-se zonas ricas em ligantes e zonas ricas em agregados. A mistura resultante apresenta-se heterogênea, não se verificando a presa da argamassa” (APFAC, 2007).

Diversos autores e estudos publicados têm vindo a verificar que a utilização de areias muito finas em argamassas justifica a utilização de maior quantidade de água na fase de amassadura. Mais tarde esta condição traduz-se no surgimento de fissuração aquando da retracção por secagem (RATO, 2006), (BOTAS, 2009), (MARGALHA, et al., 2007), (MARTINS, 2010).

Uma granulometria adequada que permita maximizar a compacidade faz com que o volume de vazios seja minimizado, reduzindo a quantidade de ligante e tornando a argamassa mais compacta e com menor custo.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS ADOPTADOS NO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

No desenvolvimento experimental executaram-se e caracterizaram, no estado fresco, argamassas de cal aérea com percentagens crescentes de substituição de cal aérea por metacaulino comercial, realizaram-se provetes dessas argamassas que se submeteram a duas condições de cura em exposição natural e que foram caracterizados no estado endurecido a 28, 60 e 90 dias.

Este desenvolvimento experimental foi programado e organizado pela Professora Doutora Paulina Faria, orientadora da dissertação, no âmbito do projecto de investigação financiado pela FCT-MCTES METACAL (FARIA, 2011), e com o apoio dos Doutores Rosário Veiga (co-orientadora da dissertação) e António Santos Silva, ambos do LNEC. Desenvolveu-se em paralelo com o estudo realizado por dois outros colegas do MIEC (Sónia Robalo e Nuno Felgueiras), em que o primeiro avaliou argamassas sujeitas a aspersão diária com água potável ou com água do mar, a 65% de humidade relativa, e o segundo avaliou argamassas sujeitas a condições de cura a 65% e a 95% de humidade relativa.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1. CAL AÉREA

Para a realização de todos os provetes necessários para este estudo foi utilizada uma cal aérea hidratada em pó da marca **Lusical - CL90**. Durante a realização do trabalho constituiu preocupação constante manter o saco da cal protegido, bem fechado, em local seco e isento de humidades.

3.1.2. METACAUPLINO

O Mk utilizado para a execução dos provetes foi o **Metacaulino Argical M 1200 S**, um metacaulino comercial francês (uma vez que em Portugal não é comercializado continuamente nenhum metacaulino).

Também com a utilização do Mk houve sempre a preocupação de o manter em local seco e protegido de humidades.

3.1.3. AREIAS

Como agregado foi utilizada uma mistura de areias siliciosas lavadas da AREIPOR (traço volumétrico de 1:1,5:1,5 de APAS12, APAS20 e APAS30).

Todas as areias foram fornecidas em sacas e foram utilizadas secas. As areias apresentavam granulometrias diferentes, sendo a mais grossa a APAS12, a intermédia a APAS20 e a mais fina a APAS30.

3. Materiais e procedimentos adoptados no desenvolvimento experimental

Para todas as areias e para a mistura de areias foram efectuados no LNEC ensaios de baridade (Ba), volume de vazios (Vv) e análise granulométrica.

O objectivo da mistura das areias foi criar uma mistura bem graduada, com o menor volume de vazios possível, uma vez que, como referido anteriormente, uma mistura equilibrada e a procura de uma granulometria bem distribuída com um traço em ligante não muito forte, evitam problemas motivados pela retracção (MARTINS, 2010).



Figura 1 - Cal aérea e areia utilizadas.

3.2. DETALHES DAS MISTURAS E CONDIÇÕES DE CURA

Todas as misturas de argamassas foram realizadas com o traço volumétrico 1:3 de cal aérea, com substituições crescentes em massa de cal aérea por metacaulino (0, 10, 20, 30, 50%). Para o estudo desenvolvido foram assim concebidos cinco tipos de argamassas diferentes, às quais posteriormente foram atribuídas letras para melhor identificação das mesmas.

Foram estudadas duas condições de cura distintas, uma visava analisar a influência do ambiente marítimo, designada pela letra 'M', a outra procurava estudar a influência do ambiente urbano 'U'.

Para cada tipo de argamassa (A, B, C, D, E) e cada tipo de cura (M, U) foram produzidos 21 provetes para serem ensaiados a idades diferentes (28 dias, 90 dias, 180 dias, 1 ano. Contudo, neste estudo apenas foram feitos ensaios às duas primeiras idades, respectivamente 28 e 90 dias. Posteriormente, com a análise dos primeiros ensaios foi decidido estudar também a idade de 60 dias, de forma a encurtar o espaço temporal dos ensaios e considerando que os primeiros resultados não foram muito satisfatórios.

A inclusão de ensaios aos 60 dias deveu-se sobretudo a duas fortes precipitações, ocorridas durante o mês de Abril, que afectaram de forma significativa a superfície dos provetes exposta directamente à acção da chuva.

Em face do exposto foi possível obter um campo de resultados com um intervalo mais reduzido, apresentando uma evolução mais sequencial de patamar de valores. Por questões de

3. Materiais e procedimentos adoptados no desenvolvimento experimental

logística, à idade de 60 dias apenas foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade (E) e resistência à compressão (R_c) com uma das metades resultantes do ensaio de flexão (R_f) a 28 dias.

No Quadro 2 apresenta-se de forma sucinta a composição das argamassas realizadas para elaboração do trabalho de pesquisa.

Quadro 2 - Composição das argamassas estudadas.

ARGAMASSA		COMPOSIÇÃO	
TIPO	REF ^a	DOSAGEM VOLUMÉTRICA	CONSTITUINTES
Cal aérea	A	1:3	Cal aérea : areia
Cal aérea c/ substituição parcial de massa por metacaulino (Mk) e areia	B (10% Mk)	1:3	Cal aérea+Mk : areia
	C (20% Mk)	1:3	Cal aérea+Mk : areia
	D (30% Mk)	1:3	Cal aérea+Mk : areia
	E (50% Mk)	1:3	Cal aérea+Mk : areia

Como referido anteriormente, para a realização deste trabalho foram estudados dois tipos de cura distintos.

Cura em exposição natural em ambiente marítimo (maritime environment) **M**: na cobertura do edifício IX do DEC no Monte de Caparica com a orientação E-O (perpendicular à linha da costa).

Cura em exposição natural em ambiente urbano (urban environment) **U**: na estação de ensaio natural do LNEC com a orientação S-N.



Figura 2 - Exposição em ambiente marítimo (M) e urbano (U), respectivamente.

A título de exemplo, para melhor compreensão, será explicada a designação do provete **BU7** - a primeira letra “B” refere-se ao tipo de mistura, e significa que a argamassa possui uma substituição parcial da massa de cal por 10% de Mk, a segunda letra refere-se ao tipo de cura, neste caso, “U”, significa que este provete foi sujeito a uma exposição natural em ambiente urbano na estação natural do LNEC, e o n.º “7” identifica o provete quanto à idade e tipo de ensaio a que será submetido (ensaio de resistência à tracção por flexão, R_t , aos 90 dias).

3. Materiais e procedimentos adoptados no desenvolvimento experimental

O Quadro 3 pretende sintetizar o tipo de argamassas testadas, a condição de cura analisada, qual o ensaio realizado e a identificação dos provetes que se destinam a cada tipo de ensaio e a cada idade de estudo.

Quadro 3 - Tipo das argamassas, cura e n.º do provete.

Argamassa:		A	B	C	D	E
Cura	Ensaio	Provetes	Provetes	Provetes	Provetes	Provetes
M	E	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capil+Secagem	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6
	R _{90d}	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9
	R _{28d}	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12
	R _{180d}	13, 14, 15	13, 14, 15	13, 14, 15	13, 14, 15	13, 14, 15
	R _{1 ano}	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18
U	E	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capil+Secagem	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6
	R _{90d}	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9
	R _{28d}	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12
	R _{180d}	13, 14, 15	13, 14, 15	13, 14, 15	13, 14, 15	13, 14, 15
	R _{1 ano}	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18

A, B, C, D, E - Argamassas explicadas no Quadro 2; tipos de cura M e U respectivamente, ambiente marítimo e urbano; ensaios E - módulo de elasticidade dinâmico, Capil - capilaridade, Secagem – secagem, R_{90d} - resistência à flexão e à compressão a 90 dias, R_{28d} - resistência à flexão e à compressão a 28 dias, R_{180d} - resistência à flexão e à compressão a 180 dias, R_{1 ano} - resistência à flexão e à compressão a 1 ano; as células a cinzento representam os ensaios que irão decorrer numa fase mais avançada da investigação, que já não se encontra no âmbito do estudo desta dissertação.

A numeração dos provetes permite um controlo mais eficaz do plano de ensaios na medida em que estão salvaguardados todos os ensaios a todas as idades. Permite ainda ensaiar sempre os mesmos provetes ao módulo de elasticidade (E) e observar desta forma o evoluir do comportamento do ensaio no mesmo provete. Outro aspecto importante é o controlo dos provetes sujeitos aos ensaios de capilaridade e secagem. Como inicialmente se optou pela realização deste ensaio até atingir massa constante em ambos os ensaios, estes são longos e os provetes estão muito tempo (cerca de duas semanas) em ambiente de laboratório e por isso fora da condição de cura. Admitiu-se

assim que os provetes não irão apresentar as mesmas características de um provete da mesma argamassa feito na mesma altura mas que se mantivesse permanentemente em cura. Por outro lado, alguns dos provetes submetidos aos ensaios de capilaridade e de secagem danificaram-se bastante. Após os ensaios aos 28 dias programou-se passar a efectuar estes ensaios com o meio provete resultante do ensaio de flexão à mesma idade de caracterização.

Contudo a troca pontual na numeração de provetes foi sempre um aspecto possível desde que os provetes tivessem sido realizados na mesma altura. Por exemplo, caso se partisse algum dos provetes necessários para o módulo de elasticidade (E) era sempre possível a sua substituição através de um provete realizado na mesma data para um ensaio de resistência mecânica.

3.3. PLANO DE ENSAIOS

3.3.1. GENERALIDADES

A utilização de argamassas com base em cal aérea para uso em situações que visem a conservação de edifícios deve ser alvo de estudo para aferir determinadas características de compatibilidade. Com este intuito devem ser desenvolvidos trabalhos/ensaios laboratoriais de modo a permitir a sua correcta avaliação, sendo de extrema importância que estes trabalhos sejam comparáveis e que se possam reproduzir.

Os investigadores Charola e Henriques (CHAROLA, et al., 1999) consideram que, apesar da importância dos ensaios laboratoriais, nomeadamente no que toca a definir quadros de gamas de valores para determinados ensaios que se possam considerar representativos do comportamento global de determinado produto, esses resultados não são absolutos uma vez que existem diferenças claras entre a caracterização laboratorial e *in situ*.

3.3.2. NORMAS EXISTENTES

Actualmente existem várias normas e recomendações para a caracterização de argamassas, cuja padronização para um contexto laboratorial se mostra difícil. Quase todas as referências existentes neste domínio se adequam mais à caracterização de pedra natural ou a argamassas com base em outros ligantes que não a cal aérea, que foi o alvo do estudo desenvolvido.

A normalização existente é muito vasta mas por vezes peca por não ser muito específica e nem sempre fácil de reproduzir, especialmente quando se trata do desenvolvimento de estudos laboratoriais. Muitas vezes numa situação limite de informação pouco detalhada, não abrangente ou pouco adaptada a alguns tipos de argamassas e/ou condições de aplicação, continuam a adoptar-se procedimentos não padronizados que variam de autor para autor e de laboratório para laboratório (FARIA, 2004). A situação descrita resulta sobretudo pela diversidade de procedimentos existentes, o que torna impossível a comparação quantitativa entre os resultados decorrentes de diferentes estudos mesmo no caso de investigações baseadas em especificações idênticas. O simples facto da utilização de diferentes laboratórios pode influenciar as propriedades das argamassas de forma

significativa, sendo que factores como as condições ambientais do laboratório, diferentes operadores ou alterações de utensílios podem condicionar os resultados do estudo desenvolvido (FARIA, 2004).

3.3.3. REPRODUÇÃO DO ESTUDO DESENVOLVIDO

A possibilidade de reprodução do estudo desenvolvido é dos factores mais importantes que é necessário ter em conta. Para tal é essencial uma descrição exaustiva de todos os procedimentos e métodos realizados durante a campanha experimental, produção e execução das argamassas e ensaios realizados.

Em termos de execução dos provetes de argamassa são importantes os aspectos relativos à preparação da argamassa, moldes e produtos descofrantes, trabalhabilidade da argamassa, condições de cura e idade do provete à data de ensaio. Relativamente à preparação das argamassas é necessário definir de forma clara o tipo de dosagem (traço), o tipo de mistura, o tipo de compactação e condições de cura inicial. Em face disso, estas características serão alvo de descrição detalhada em capítulo próprio.

A metodologia preconizada passou pela realização de 3 provetes prismáticos, para cada idade e para cada condição de cura, para ensaios mecânicos (3 para módulo de elasticidade dinâmico, 3 para resistência à flexão, sendo que das 6 metades resultantes do ensaio, 3 foram utilizadas para resistência à compressão, enquanto as outras 3 metades voltaram para a cura respectiva a fim de serem utilizadas a 60 dias para avaliação da resistência à compressão; a partir dos 90 dias estas 3 metades passaram a ser utilizadas à mesma idade para determinação da absorção capilar e da secagem) e outros 3 provetes para ensaios de capilaridade findos os quais foram sujeitos a secagem (alguns destes provetes ficaram bastante deteriorados ao serem ensaiados aos 28 dias, passando a ser utilizadas as metades sobranes da R_t a partir dos 90 dias, tal como referido). O maior topo de cada metade de provete sujeito ao ensaio de resistência à compressão foi utilizado para determinação da porosidade aberta e o material sobranes da compressão acondicionado em saco de plástico fechado para caracterização química, mineralógica e microestrutural. Desta forma foi possível ter um campo de resultados que se considerou representativo do conjunto de características obtidas.

3.3.4. ENSAIOS REALIZADOS

3.3.4.1. Descrição geral

Apresentam-se de seguida os ensaios que foram alvo de estudo para a caracterização, no estado fresco e endurecido, das cinco formulações de argamassa estudadas para ambas as condições de cura.

A caracterização das argamassas no estado fresco foi realizada no momento de execução das argamassas, em termos da consistência por espalhamento (Esp). O plano de ensaios de caracterização no estado endurecido foi elaborado para as idades de caracterização referidas anteriormente, englobando ensaios mecânicos, físicos, químicos e mineralógicos, realizados aos 28, 60 e 90 dias de cura.

3. Materiais e procedimentos adoptados no desenvolvimento experimental

A caracterização de materiais no estado endurecido envolve dois tipos de ensaios - os ensaios destrutivos e os ensaios não destrutivos. Estes apresentam a vantagem de poderem ser realizados sobre os mesmos provetes ao longo da idade. Desde logo não implicam a destruição do material, este tipo de ensaios permite que se mantenham as propriedades mecânicas, químicas, físicas e dimensionais dos materiais.

Os ensaios não destrutivos são uma mais-valia em termos de economia de tempo e dinheiro. Porém, os ensaios destrutivos são essenciais para se conhecer a adequabilidade de um determinado material sendo por isso também muito importantes de estudar e caracterizar.

A caracterização no estado endurecido incluiu os seguintes ensaios:

Ensaio mecânicos:

- Módulo de elasticidade dinâmico (E);
- Resistência à Flexão (R_t);
- Resistência à Compressão (R_c).

Ensaio físicos:

- Absorção de água por capilaridade;
- Secagem;
- Porosidade aberta (Pa).

Ensaio químicos, mineralógicos e microestruturais:

- Análise por MEV;
- Análise por DRX;
- Análise por ATG.

Para melhor percepção dos ensaios realizados às idades de estudo definidas é apresentado no Quadro 4 uma síntese de todos os ensaios cruzada com a idade de caracterização.

Quadro 4 - Ensaio efectuados.

Ensaio	Idades de estudo		
	28 dias	60 dias	90 dias
Módulo de elasticidade (E)	✓	✓	✓
Resist. Tracção (R_t)	✓	×	✓
Resist. Compressão (R_c)	✓	✓	✓
Abs. por capilaridade e secagem	✓	×	×
Porosidade aberta	✓	×	×
MEV, DRX, ATG	✓	×	×

3.3.5. FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS ESTUDADAS

Todos os traços das argamassas realizadas no âmbito deste estudo são volumétricos de 1:3, de ligante (cal aérea ou cal aérea + metacaulino) e areia. Como referido anteriormente, a areia resulta de uma mistura na proporção volumétrica de 1 de areia APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30.

Com o objectivo de avaliar quais as quantidades reais de material que iriam ser necessárias para desenvolver o estudo, facilitando e tornando rigorosos todos os cálculos inerentes à preparação das argamassas, procedeu-se à conversão do traço volumétrico das argamassas em traço em massa.

Como estas argamassas constituem um conjunto de argamassas de base a serem estudadas no referido projecto, METACAL, no LNEC foi previamente avaliada a quantidade de constituintes por amassadura, incluindo a quantidade de água, com vista à obtenção de argamassas comparáveis em termos de aplicabilidade e influência da água. Para melhor percepção dos vários tipos de argamassas, é apresentado no Quadro 5 a quantidade de materiais utilizada em cada amassadura. De forma simplificada este quadro visa explicar a proporção das misturas e as designações atribuídas às diferentes características. Este quadro representa a capacidade da cuba normalizada do LNEC. Nas argamassas realizadas na FCT verificou-se que a cuba tinha maior capacidade. De forma segura e sem desperdícios foi possível aumentar em 1,5 vezes a quantidade de material e conseguiram-se normalizar as quantidades de forma a reduzir o número de amassaduras.

Quadro 5 – Massa de cada material utilizada na amassadura – quantidades para 6 provetes [LNEC].

Material [g]	Argamassas				
	A _(ref)	B	C	D	E
Cal aérea	240,0	205,0	170,0	140,0	100,0
Metacaulino	-	20,5	34,0	42,0	50,0
Areia APAS 12	733,0	757,0	777,0	762,0	747,0
Areia APAS 20	1094,0	1130,0	1160,0	1137,0	1106,0
Areia APAS 30	1080,0	1116,0	1146,0	1123,0	1092,0
Água [ml]	620	630	650	640	640

3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

3.4.1. ANÁLISE DA CURVA GRANULOMÉTRICA

Este ensaio foi realizado no LNEC, pelos bolseiros responsáveis pela caracterização inicial dos materiais utilizados nos projectos Metacal e Azulejar, e utilizado com o objectivo de determinar as características granulométricas das areias utilizadas na produção das argamassas.

O ensaio realizado baseou-se no disposto na norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000). A distribuição granulométrica dos materiais granulares (areias) será obtida pelo processo de peneiração.

O objectivo do processo de peneiração é a separação das partículas em diversas fracções; para tal utiliza-se uma série de peneiros de abertura de malhas conhecidas [Figura 3].

3. Materiais e procedimentos adotados no desenvolvimento experimental

Os peneiros utilizados estão em conformidade com as exigências da ISO 3310-1 (ISO, 2000) e encontram-se referenciados no quadro seguinte. Para cada tipo de areia foram utilizadas diferentes séries de peneiros sendo que essa situação está descrita no Quadro 6.



Figura 3 - Equipamento de ensaio para análise granulométrica.

Quadro 6 - Séries de peneiros utilizados para análise granulométrica respectivamente das areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30/mistura de areias.

Abertura da malha [mm]	Abertura da malha [mm]	Abertura da malha [mm]
4,75	4,75	4,75
2,36	2,36	2,36
1,7	1,7	1,7
1,18	1,18	1,18
0,85	0,85	0,85
0,71	0,71	0,71
0,6	0,6	0,6
	0,5	0,5
	0,425	0,425
		0,3
		0,25
		0,212
		0,15

3.4.1.1. Procedimento de ensaio

No trabalho desenvolvido, a fim de efectuar a análise granulométrica das areias APAS12, APAS 20 e APAS 30 e da mistura de areias segundo a proporção 1 APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30, primeiro foram colocadas em estufa, durante 24h a 110 °C, porções das três areias utilizadas até se obter massa constante. De seguida foram retiradas quantidades de areias de cada granulometria, que posteriormente foram esquarteladas e pesadas. Esta amostra foi colocada no peneiro de maior abertura da série previamente escolhida e levada a uma peneiração mecânica onde permaneceu durante o tempo necessário à separação das fracções. Deve concluir-se a peneiração quando durante 1 minuto não passar mais de 1% do material retido nesse peneiro.

De seguida efectuou-se a pesagem do material retido em cada peneiro e obteve-se a massa do que passou por todos eles.

Para cada tipo de areia foram ensaiadas três amostras distintas, a partir das quais foi feita uma média.

Os resultados obtidos são expressos em forma de uma curva granulométrica, em função da abertura da malha do peneiro.

3.4.2. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE

Este ensaio foi realizado no LNEC, pelos bolseiros responsáveis pela caracterização inicial dos materiais utilizados nos projectos Metacal e Azulejar, e utilizado com o objectivo de determinar esta característica dos constituintes sólidos utilizados na produção das argamassas.

A determinação da baridade foi efectuada de acordo com o estabelecido na norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002). Este ensaio tem como finalidade a determinação da massa de agregado seco que preenche um recipiente de capacidade conhecida.

É com base no resultado deste ensaio que se transforma o traço volumétrico de uma argamassa no traço em massa.

A utilização de um traço em massa é mais conveniente em termos laboratoriais, por permitir uma dosagem mais exacta (MARTINS, 2010).

Este ensaio apenas é exequível em materiais granulares ou pastas, sendo que a baridade de um determinado material depende do grau de compactação, da granulometria e da forma das partículas.

3.4.2.1. Procedimento de ensaio

– Capacidade dos recipientes

De acordo com as indicações da norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002) foi determinada a capacidade, V , do recipiente. Para tal, o recipiente foi totalmente preenchido com água com consequente medição da sua temperatura, t_a . De seguida o conjunto (recipiente + água) foi tapado com uma placa acrílica de modo a que não existam bolhas de ar entre a superfície da água e da

placa [Figura 4]. Posteriormente, o conjunto foi pesado numa balança de precisão de 0,01g, sendo que a massa do recipiente e da chapa foram previamente determinadas.



Figura 4 - Recipiente preenchido com água.

A capacidade V foi calculada através da expressão:

$$V = \frac{m}{\rho} \text{ [cm}^3\text{]}$$

em que:

m - massa da água [g]

ρ - massa volúmica da água à temperatura t_a [g/cm³]

O valor da massa volúmica presente na expressão anterior é dado segundo a temperatura a que a água se encontra aquando do ensaio.

Os volumes dos recipientes usados resultam da média de três medições.

– Determinação da baridade

O ensaio do ligante e do metacaulino foi realizado segundo as indicações do documento técnico do CSB (CSTB, 1963).

A cal aérea foi colocada numa estufa à temperatura de 40 °C até atingir massa constante. De seguida o material foi vertido para o recipiente respectivo através de um funil de sólidos [Figura 5]. Quando o recipiente ficou cheio de cal, formando um cone no seu cimo, foi parado o “escorrimento”. O recipiente foi colocado de forma a que o seu aro se encontrasse a 73 mm do bordo inferior do funil. Por fim o material em excesso é rasado com um utensílio metálico plano, de forma lenta e com movimentos de serra, tendo o cuidado de não compactar o material.



Figura 5 - Esquema de ensaio da baridade (material a ser vertido para o copo); materiais usados no ensaio.

O ensaio do metacaulino seguiu o mesmo procedimento.

O ensaio das areias foi realizado segundo as indicações da norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002). O procedimento de ensaio foi semelhante ao do ligante, com a ligeira diferença da temperatura da estufa (110 °C) e da altura do aro do recipiente em relação ao bordo inferior do funil (50mm).

É importante garantir que no processo de enchimento dos recipientes o material seja colocado dentro destes de uma forma gradual e a velocidade constante.

Depois de preenchido o recipiente, este foi pesado numa balança com precisão de 0,01g, m_3 . A massa do recipiente foi previamente registada na balança, m_0 .

Foram determinadas para cada areia e cada ligante três medições de massas e respectiva baridade.

A baridade é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$B_a = \frac{m_3 - m_0}{V} \times 1000 \quad [\text{g/cm}^3]$$

em que:

B_a – baridade, em g/cm^3

m_3 – massa do recipiente cheio, em g

m_0 – massa conhecida do recipiente, em g

V – volume conhecido do recipiente, em cm^3

3.5. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.5.1. PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO

Para otimizar as condições de produção de provetes de argamassa e datas de ensaios (e uma vez que na UNL em simultâneo estavam a ser realizados provetes de argamassas para uma condição de cura analisada no âmbito desta dissertação mas também para mais outras quatro diferentes condições de cura), numa 1ª fase no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de

Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (**DEC/FCT-UNL**) foram executados os provetes numerados de 1 a 9, de cada argamassa, para serem sujeitos a ensaio de módulo de elasticidade E (3 provetes), ensaio de Capilaridade e Secagem (3 provetes) e ensaios de resistência a tracção por flexão e à compressão aos 90 dias (3 provetes).

No Laboratório Nacional de Engenharia Civil, **LNEC**, uma vez que a logística e número de provetes a realizar foi menor (apenas para uma condição de cura), conseguiu-se otimizar as condições de produção sendo que numa primeira fase foram logo executados 12 provetes de cada argamassa (numerados de 1 a 9 e ainda de 10 a 12 para R_t e R_c 28 dias).

Optou-se por realizar primeiro os provetes a ensaiar numa idade mais avançada do estudo de forma a otimizar o período de tempo para realização dos ensaios de caracterização previstos.

Após concluída a primeira fase de execução de argamassas iniciou-se a produção dos provetes remanescentes de cada argamassa, a saber provetes numerados de 10 a 21, na UNL, para resistências a 28 dias (3 provetes), resistências a 180 dias (3 provetes), resistências a 1 ano (3 provetes) e resistências a longa idade (3 provetes) e os provetes numerados de 13 a 21 no LNEC.

No total foram executados 21 provetes prismáticos de dimensões (4x4x16) cm de cada argamassa para cada condição de cura, perfazendo um total de 210 provetes executados no **DEC/FCT-UNL** (105 provetes) e no **LNEC** (105 provetes).

Algumas diferenças entre protocolos utilizados serão alvo de estudo em sub-capítulo posterior (3.5.6. Diferenças de procedimentos LNEC / UNL).

Relativamente à definição da quantidade de provetes a executar, esta teve por base o tipo e o número de ensaios que se planeou realizar para a caracterização das argamassas, assim como as diferentes idades de caracterização.

3.5.2. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS - CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

As normas existentes para a preparação de argamassas referem-se principalmente a argamassas com base em cimento, todavia, todos os procedimentos de ensaio tiveram como base as indicações da norma EN 1015-2/A1 (CEN, 1998/2006) com algumas alterações, nomeadamente no que respeita aos tempos de amassadura mecânica de argamassas com base em cal aérea.

Como já se enunciou anteriormente no sub-capítulo **3.2 Detalhes das Misturas**, foram executados cinco tipos distintos de argamassas (A, B, C, D e E), todos ao traço volumétrico 1:3 - um volume de cal aérea em pó (cal), ou de cal aérea e metacaulino (Mk): três volumes de mistura de areia (mistura constituída por 1 volume de APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30). Nas argamassas em que se utilizou metacaulino, este foi usado em substituição parcial da massa de cal aérea.

Conhecida a baridade das matérias-primas multiplicou-se pelo volume necessário para obtenção do traço volumétrico pretendido e calculou-se assim a quantidade de material necessário para a preparação das argamassas.

3.5.2.1. Cuidados a ter num laboratório

Como precaução antes de se começar qualquer trabalho num laboratório devem ser feitas algumas verificações prévias para garantir que nada está em falta, a fim de assegurar um trabalho isento de falhas. No caso concreto as verificações passaram pelos seguintes itens (FARIA, 2011):

- Verificação da existência de matérias primas, do bom estado dos equipamentos e da existência de utensílios, tais como luvas e máscara para pó, utensílios para espalhamento (cone, varão, régua e craveira), cronómetro, sacos de plástico, lápis para marcação de moldes.
- Verificação do número e aperto dos moldes e da prévia aplicação (e remoção quando em excesso) de descofrante (50% de massa consistente e 50% de óleo de automóvel).
- Colocação do 1º molde na mesa de compactação com o acréscimo dos moldes (quando para compactação mecânica).

3.5.3. AMASSADURAS

Inicialmente começou por se pesar os três tipos de areias, a cal e o metacaulino, conforme o tipo de argamassa em que se estava a trabalhar no momento, numa balança de precisão 0,1g. Seguiu-se a homogeneização manual dos constituintes secos em tabuleiro e posterior colocação na cuba misturadora mecânica, procurando minorar a libertação de pó.



Figura 6 - Pesagem dos constituintes; homogeneização dos mesmos e posterior colocação na cuba misturadora mecânica.

Em provetas graduadas, foi medida a quantidade de água a adicionar para cada tipo de argamassa. A quantidade de água utilizada foi a necessária para a obtenção de uma argamassa trabalhável e supostamente utilizável *in situ*.

De acordo com procedimentos previamente definidos para a produção da argamassa colocou-se a misturadora em funcionamento na velocidade lenta durante 2,5 minutos, sendo que nos primeiros 15 segundos de amassadura foi introduzida a quantidade de água de forma contínua. Ao fim dos 2,5 minutos fez-se uma breve paragem da misturadora para que se procedesse à raspagem das paredes e do fundo do molde, bem como da própria pá da misturadora. Para esta finalidade foi utilizado um rapa.

3. Materiais e procedimentos adoptados no desenvolvimento experimental

Finalmente, sempre na velocidade mais lenta, foi retomada a amassadura por mais 30 segundos.

Os passos descritos neste último ponto foram baseados nas normas NP EN 196-1 (IPQ, 2006) e EN 1015-2/A1 (CEN, 1998/2006); porém como já foi referido em 3.5.2. estes procedimentos sofreram algumas alterações uma vez que as normas estão mais vocacionadas para argamassas de cimento e alguns passos para argamassas de cal aérea não se conseguem implementar.



Figura 7 - Amassadura mecânica dos constituintes; aspecto final.

3.5.4. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A quantidade de água utilizada foi a necessária para a obtenção de uma argamassa trabalhável e utilizável *in situ*, tendo-se registado a consistência por espalhamento com base na norma EN 1015-3/A1/A2 (CEN, 1999/2004/2006).

O estado fresco de uma argamassa define-se pela sua trabalhabilidade. Uma argamassa que não possua boa trabalhabilidade, será difícil de aplicar e torna-se mais porosa do que o desejável.

Existe um aparelho de laboratório chamado mesa de espalhamento que permite avaliar a consistência e dar ideia da trabalhabilidade de uma argamassa.

Com o intuito de verificar se os espalhamentos estavam de acordo com o estipulado pela investigação em curso (*projecto FCT METACAL*), sempre que se realizou uma amassadura foi feita a determinação do espalhamento que deveria apontar para o valor de 150 +/- 10mm. No entanto, em virtude das mesas de espalhamento utilizadas no LNEC e na UNL serem distintas (a primeira de acordo com a norma actual e a segunda sem estar de acordo com aditamentos à norma que ditaram a alteração da sua massa), e por ensaios comparativos prévios de que se teve informação oral pela Doutora Rosário Veiga, existe justificação para as diferenças obtidas.

3.5.4.1. Procedimento de ensaio

Para dar início a este ensaio foi primeiro necessário proceder ao humedecimento da mesa de espalhamento, do cone e do varão. De seguida, de acordo com a norma, colocou-se o molde

centrado na mesa de espalhamento e preencheu-se o cone em duas camadas de argamassa, cada uma com um mínimo de 10 inserções do varão para eliminação de vazios. Depois razou-se a superfície do cone e removeu-se o mesmo. Rodou-se o equipamento de modo a este dar 15 quedas em 15 segundos e finalmente, com o auxílio de uma craveira e uma régua, mediu-se o diâmetro da argamassa em duas direcções opostas e registou-se a média, em mm.

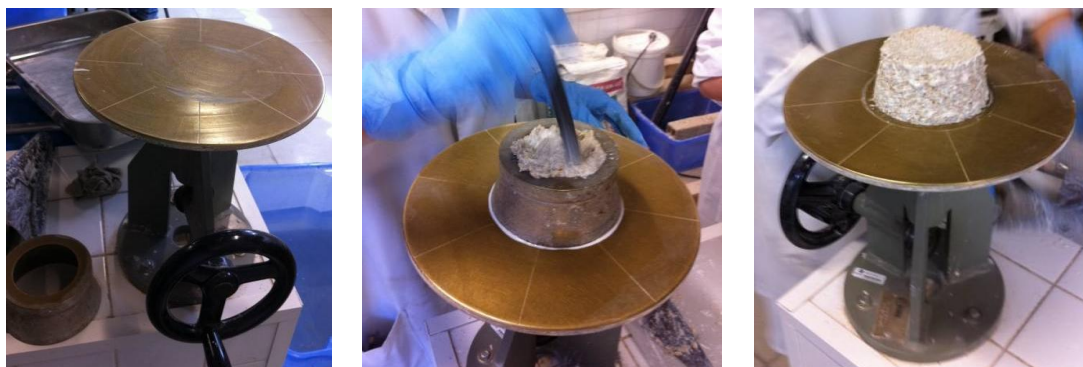


Figura 8 - Mesa de espalhamento da UNL; preenchimento do cone e respectiva compactação; aspecto antes das 'quedas'.

O espalhamento registado é a média dos valores resultantes das leituras efectuadas por amassadura para cada argamassa.

3.5.5. EXECUÇÃO DOS PROVETES

3.5.5.1. Moldagem, desmoldagem e cura inicial dos provetes

A produção das argamassas e dos provetes tem de obedecer a critérios rígidos, nomeadamente têm de ser sempre executadas nas mesmas condições e com o mesmo rigor, de forma a evitar variabilidades de características nas argamassas. É muito importante caracterizar esta etapa do estudo de forma clara, de modo a ser possível a sua reprodução (FARIA, 2004).

Para a execução dos provetes prismáticos, primeiro procedeu-se ao preenchimento dos moldes prismáticos (40x40x160mm), de acordo com a NP EN 196-1 (IPQ, 2006). Para tal começou por se fixar o molde e o acréscimo do molde ao compactador mecânico (UNL); de seguida procedeu-se ao seu preenchimento em duas fases. A primeira consistiu em preencher o molde com argamassa até um pouco mais de metade da sua altura, seguindo-se uma compactação mecânica de 20 pancadas. Na segunda fase o molde foi totalmente preenchido, excedendo-se inclusivamente um pouco o seu nível, a que se seguiu nova compactação mecânica de outras 20 pancadas. Mais uma vez existiu aqui uma pequena alteração à norma EN 196-1 (IPQ, 2006), segunda a qual as compactações deveriam ser de 60 pancadas em vez das 20 adoptadas para cada preenchimento.

No LNEC não foi utilizado compactador mecânico, tendo sido efectuada compactação manual. A argamassa foi colocada também em duas camadas nos moldes, tal como na compactação mecânica, mas desta vez cada uma delas é compactada manualmente com 25 pancadas com um pilão de secção quadrada (12mm de lado) em material plástico não absorvente.

3. Materiais e procedimentos adoptados no desenvolvimento experimental

De seguida cada um dos quatro lados do molde é levantado a cerca de 30° com a horizontal e deixado cair duas vezes sobre a mesa (total de 8 quedas).

Após compactação, raza-se a superfície do molde com movimento de serra.



Figura 9 - Compactador mecânico; colocação do acréscimo dos moldes.



Figura 10 - Compactação mecânica dos moldes.

A cura inicial passou por manter os provetes durante 6 dias dentro de um saco de polietileno fechado e cheio como se fosse um balão (para evitar contacto com a superfície da argamassa e entrada de vapor de água e CO_2 de forma a que a evaporação da água seja lenta).



Figura 11 - Aspecto final do molde após compactação mecânica; posterior razamento com movimento de 'serra'; aspecto final.

Depois dos 6 dias de cura inicial, em saco de polietileno fechado, os provetes foram desmoldados com muito cuidado porque as suas resistências ainda eram muito baixas. As argamassas só de cal, sem qualquer adição de Mk, apenas puderam ser desmoldadas 13 dias depois uma vez que ao fim de 6 dias ainda não apresentavam qualquer resistência. Contudo ao fim de 6 dias o saco onde se encontravam foi aberto durante 1 dia, avaliada a possibilidade (negativa) de serem desmoldados, e mantiveram-se em contacto directo com o ambiente do laboratório fora do saco até à

desmoldagem. Depois de desmoldados, todos os provetes foram identificados e numerados de acordo com o tipo de argamassa constituinte, condição de cura a que iam ser sujeitos e ensaio a que iam ser submetidos. Após a marcação os provetes foram colocados durante um dia em ambiente de laboratório (LNEC) e em sala com humidade elevada ($\pm 95\%$ Hr - UNL) na tentativa de aumentar a sua resistência inicial antes de serem colocados em exposição natural.



Figura 12 - Cura inicial, 6 dias em saco de plástico fechado.

3.5.6. DIFERENÇAS DE PROCEDIMENTOS LNEC / UNL

Devido à dimensão da cuba, e para otimizar o volume de argamassa produzido, uma vez que, no âmbito da dissertação de três estudantes e de trabalhos de investigação subsequentes estavam previstos realizar 525 provetes na UNL, foi possível reforçar a dosagem dos constituintes em 1,5 vezes de forma a conseguir realizar mais moldes por amassadura (3 moldes e meio, mais ou menos 10/11 provetes). No LNEC as quantidades por amassadura foram as definidas no *Quadro 5*, segundo as quais foi possível executar 6 provetes por amassadura.

Outra diferença nos procedimentos ocorreu no ensaio de espalhamento, uma vez que o equipamento do LNEC respeita o aditamento mais recente da norma, o que não acontece com o da UNL.

Em alternativa à compactação mecânica na UNL, foi realizada compactação manual no LNEC. Embora se tenha efectuado uma compactação mecânica mais ligeira (20 pancadas em cada camada em vez das 60 por camada definidas na norma) estima-se que alguma diferença possa residir na compactação das argamassas colocadas em cada condição de cura (U – efectuadas no LNEC e M – efectuadas na UNL). Contudo, e de modo a poder avaliar esta situação, alguns provetes foram realizados no LNEC e submetidos à cura marítima na UNL para se compararem com os provetes aí realizados e submetidos à cura M.

3.6. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO - ENSAIOS REALIZADOS

Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram sujeitos durante 24 horas a ambiente controlado à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa em sala própria, a fim de assegurar que atingiam condições mais uniformes. A excepção foi o ensaio de capilaridade onde

os provetes antes de ensaiados estiveram na estufa durante 48 horas a 60°C, para atingirem massa constante.

3.6.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Para a realização deste ensaio a cada idade das argamassas (28, 60 e 90 dias) foram utilizados 3 provetes .

Este ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa DEC/FCT–UNL.

O módulo de elasticidade dinâmico é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. Depende da composição química, microestrutural e dos defeitos dos materiais e permite perceber a susceptibilidade das argamassas à fendilhação.

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado segundo o procedimento experimental definido na norma NP EN 14146 (IPQ, 2006), definida para provetes de pedra natural, que se baseia na determinação da frequência de ressonância longitudinal através de um equipamento adequado para a emissão de vibrações [Figura 13].



Figura 13 - Equipamento para ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E) da UNL.

3.6.1.1. Procedimento de ensaio

Começou por se pesar cada um dos provetes numa balança com precisão de 0,01 g.

De seguida colocou-se o provete sobre um suporte adequado no equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM 001), onde se inseriu em programa próprio a massa do provete e as suas dimensões. Este factor mostrou-se muito importante uma vez que em algumas argamassas, devido à sua elevada degradação, foi possível entrar em conta com dimensões diferentes do padronizado.

De seguida aproximaram-se de cada uma das extremidades do provete prismático, respectivamente, a fonte emissora e a unidade de recepção, registando as amplitudes das vibrações correspondentes. Para cada provete efectuaram-se um mínimo de quatro determinações, colocando a fonte emissora em cada uma das suas extremidades. O programa de cálculo determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico E em MPa, a partir do comprimento do provete L (em metros), da frequência de ressonância longitudinal calculada f_0 (em Hz), da massa volúmica do provete ρ (em N/m^3 , calculada a partir da sua massa e do seu volume) e da aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) (FARIA, 2004).

O módulo de elasticidade dinâmico registado de cada provetes é a média dos valores resultantes das leituras efectuadas e para cada argamassa/condição de cura é a média dos valores obtidos com todos os provetes correspondentes.

3.6.2. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO

Os ensaios para determinação da resistência à flexão decorreram aos 28 e 90 dias de idade das argamassas.

Para a realização deste ensaio foram utilizados 3 provetes. Este ensaio (tal como o de resistência à compressão) começou por ser realizado no ESTBarreiro/IPS – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal (1ª semana de ensaios), utilizando uma prensa de flexão/compressão com uma célula de carga para flexão de 15 kN. Posteriormente, por motivos de avaria técnica do equipamento de ensaio, na 2ª semana, foi realizado no LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Porém, por motivos de logística, disponibilidade e facilidade de realização, a partir da 3ª semana passou a ser efectuado no Laboratório de Materiais do IST/UTL. Utilizou-se o equipamento “DigiMess M-10” com uma célula de carga para a flexão de 10 kN.

Os ensaios realizados foram efectuados de acordo com o disposto na norma EN 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 1999/2006).

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga a meio vão do provete prismático. Regista-se a carga suportada pelo provete até à rotura e calcula-se a resistência à flexão do provete.

3.6.2.1. Procedimento de ensaio

Começou por se colocar o provete na prensa de flexão, de modo que ficasse centrado e com o eixo longitudinal perpendicular ao plano da força aplicada. É importante garantir que a face livre do provete aquando da moldagem não fique em contacto com nenhum dos elementos de apoio do equipamento. De forma gradual colocou-se o elemento que transmite força em contacto com a superfície do provete [Figura 15 e Figura 16]. Aplicou-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até à rotura do provete e registou-se o valor da força de rotura [Figura 14].



Figura 14 - Equipamento de ensaio do IST, prensa de flexão / compressão.



Figura 15 - Colocação do provete para ensaio de flexão.



Figura 16 - Ensaio de flexão; formação de superfície de rotura.

O equipamento de ensaio fornece uma leitura de valores em [kN] do valor de rotura do provete, F_f , bastando consultar a norma para se proceder ao cálculo da força de resistência à tracção por flexão, R_t , em $[N/mm^2]$.

A expressão utilizada é a seguinte:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{b \times d^2}$$

em que:

R_t – resistência à tracção por flexão $[N/mm^2]$;

F_f – carga de rotura à tracção por flexão [kN];

L – distância entre os dois roletes que suportam a amostra [mm];

b – espessura do provete [mm];

d – profundidade do provete [mm].

3.6.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios para determinação da resistência à compressão decorreram aos 28, 60 e 90 dias de idade das argamassas.

Para a realização deste ensaio foram utilizados os meios provetes resultantes do ensaio de resistência à flexão. O ensaio em apreço começou por ser realizado no ESTBarreiro/IPS – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal (1ª semana de ensaios), utilizando uma prensa de flexão/compressão, mas fazendo uso da parte do dispositivo para compressão com uma célula de carga de 250 kN. Posteriormente, por motivos de avaria técnica do equipamento de ensaio, na 2ª semana, foi realizado no LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Porém, por motivos de logística, disponibilidade e facilidade de realização passou a ser efectuado no laboratório de materiais do IST/UTL, sendo que o equipamento utilizado foi o mesmo do ensaio de resistência à tracção por flexão, o “DigiMess M-10” mas agora com a célula de carga de compressão. A célula de carga foi à mesma de 10 kN.

Os ensaios foram realizados de acordo com o disposto na norma EN 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 1999/2006). Regista-se a carga suportada pelo provete até à rotura e calcula-se a resistência à compressão do provete.

3.6.3.1. Procedimento de ensaio

Começou por se colocar o provete na prensa de compressão, de modo que ficasse centrado. É importante garantir que a face livre do provete aquando da moldagem não fique em contacto com nenhum dos elementos de apoio do equipamento. De forma gradual colocou-se o elemento que transmite força em contacto com a superfície do provete [Figura 17_a]. Aplicou-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até à rotura do provete e registou-se o valor da força de rotura [Figura 17_b].



Figura 17 - Ensaio de compressão; formação nítida de rótulas plásticas (mecanismo de rotura).

O equipamento de ensaio fornece uma leitura de valores em [kN] do valor de rotura do provete, F_c , bastando consultar a norma para se proceder ao cálculo da força de resistência à compressão, R_c , em [N/mm²].

A expressão utilizada é a seguinte:

$$R_c = \frac{F_c}{Secção}$$

em que:

R_c – resistência à compressão [N/mm²];

F_c – carga de rotura à compressão [kN];

Secção – área de aplicação da carga [40x40 mm²].

3.6.4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A alteração da microestrutura interna das argamassas resultante do desenvolvimento da carbonatação de argamassas de cal aérea conduz a diferenças significativas em termos das características face à capilaridade.

Para além do coeficiente de capilaridade, define-se o valor assintótico (VA) da curva de capilaridade que quantifica a quantidade total de água absorvida pelo provete.

Os ensaios para determinação da absorção de água por capilaridade e secagem decorreram aos 28 dias de idade das argamassas.

Para a realização deste ensaio foram utilizados 3 provetes inteiros para os ensaios a 28 dias.

Este ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa DEC/FCT–UNL.

Para a realização deste ensaio houve a necessidade dos provetes para ensaio se encontrarem em massa constante. Para tal foi preciso colocar previamente em estufa os provetes a ensaiar, durante 48 horas a 60°C. Dado que a duração deste ensaio é bastante extensa (primeiro dia de medições muito trabalhoso - cerca de 7 horas de ensaio), é aconselhável o início do ensaio de capilaridade durante a manhã e que o segundo dia de ensaio não coincida com o fim-de-semana, sob pena de se perder a curva do gráfico onde se dá a inflexão da capilaridade.

Este ensaio tem como objectivo determinar a absorção de água por capilaridade da argamassa endurecida.

A absorção é geralmente expressa pela diferença entre a massa do provete seco e a massa do provete de argamassa endurecido, por unidade de superfície, que se coloca com uma das faces em contacto com água durante um período de tempo de 5min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 5h, 7h, 24h, 48h e 72h.

A massa de água absorvida é dividida pela área da superfície de contacto com a água.

Os ensaios realizados foram efectuados de acordo com o disposto nas normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009).

3.6.4.1. Procedimento de ensaio

Depois dos provetes estarem na estufa durante 48 horas é necessário que arrefeçam até à temperatura ambiente, sem ganhar humidade. Durante este período de tempo pode ser acabado de preparar o equipamento de ensaio, sendo para isso necessário uma caixa estanque previamente com ambiente saturado, um tabuleiro grande e resistente, tijolos para servir de altura e promover um ambiente saturado, base impermeável descontínua para servir de base de sustentação aos provetes, azulejos para ajudar a nivelar o tabuleiro, nível de bolha e régua para medir a altura de água no tabuleiro.

Utilizando os materiais acima descritos, colocaram-se os tijolos dentro da caixa estanque, na horizontal, e preencheu-se com água até perfazer quase toda a altura dos tijolos. Com a ajuda dos azulejos e do nível de bolha colocou-se o tabuleiro em cima dos tijolos de forma perfeitamente plana. De seguida estendeu-se o material impermeável descontínuo por cima do tabuleiro e preencheu-se com uma altura de lâmina de água de 5mm.

O ensaio começa no instante t_0 , aquando da pesagem inicial dos provetes e posterior colocação no tabuleiro, utilizando uma balança de precisão de 0,001 g.

Os provetes foram introduzidos dentro da caixa, com uma ordem sequencial para facilitar todo o conjunto de pesagens que se irá seguir.

Foram executadas medições à massa de água absorvida por capilaridade, nos tempos de ensaio acima descritos (5min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 5h, 7h, 24h, 48h e 72h). Observou-se o cuidado de manter a tampa da caixa fechada entre pesagens a fim de manter o ambiente na caixa o mais saturado possível. Foi também importante manter o nível da água no tabuleiro durante todo o ensaio; para tal foi necessário adicionar água com uma pipeta sempre que se justificou, ou seja, sempre que a altura de lâmina de água no tabuleiro seja inferior a 5mm.

Para se efectuar uma medição retirou-se a tampa da caixa e, com cuidado, o provete do tabuleiro. De seguida fazendo um movimento 'seco' e rodando ligeiramente o provete (cerca de 45°) sacudiu-se o mesmo de forma a perder uma gota de água em excesso que contenha, por fim colocou-se o provete na balança e registou-se a massa relativa ao tempo t_i .

Finalmente tornou-se a colocar novamente o provete na caixa verificando o nível da água no interior e tendo o cuidado de fechar sempre bem a caixa.

O ensaio terminou quando a variação de massa entre pesagens de cada provete com um intervalo de 24h foi inferior a 1%; nesta altura assume-se que se atingiu a valor assintótico (VA) de absorção de água por capilaridade.



Figura 18 - Início do ensaio de Capilaridade.



Figura 19 - Pesagens sucessivas dos provetes de acordo com a norma de ensaio; evolução do ensaio com visível ascensão capilar da água nos provetes.

Concluído o ensaio, depois de todas as pesagens realizadas, a apresentação de resultados para todos os provetes tem como base a expressão de cálculo que se segue:

$$m = \frac{m_i - m_o}{S} [Kg / m^2]$$

em que:

m – quantidade de água absorvida, por unidade de superfície, no instante t_i , em kg/m^2

m_i – massa do provete ao fim do tempo t_i , em kg

m_o – massa do provete seco, no instante t_o , em kg

S – secção do provete em contacto com a água (40x40mm), em m^2

A análise de dados resulta no agrupamento de 3 provetes por argamassa por condição de cura de forma ao resultado ser mais representativo.

Com base nos valores obtidos foi construído um gráfico que traduz a curva de absorção por capilaridade que relaciona a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete, em massa, em função da raiz quadrada do tempo, em minutos.

O coeficiente de capilaridade (CC) é dado pela inclinação do primeiro troço linear recto da curva de absorção capilar, não tendo de passar obrigatoriamente na origem, expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e traduz a velocidade de absorção de água nos instantes iniciais. O valor assintótico corresponde ao valor máximo de água absorvida por capilaridade por unidade de área.

3.6.5. SECAGEM

Depois de concluído o ensaio de capilaridade dá-se início ao ensaio de secagem. Assume-se que o ensaio de capilaridade terminou quando a diferença entre duas pesagens sucessivas com 24 horas de intervalo não for superior a 0,1% da massa do provete seco.

O ensaio de secagem foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa DEC/FCT–UNL, numa sala onde a temperatura e a humidade relativa são controladas ($20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ Hr, respectivamente). Este ensaio teve como base o disposto em especificações da RILEM e nos estudos efectuados por Brito (BRITO, 2009) e Martins (MARTINS, 2010).

Para a realização deste ensaio os provetes foram colocados sobre filtro geotextil de forma a que o ar pudesse circular entre eles por forma a promover a secagem [Figura 20]. Foram efectuadas medições da sua massa em balança de precisão de 0,001g durante um intervalo de tempo de 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 24h, 48h e 72h.

Durante as pesagens foi tido o mesmo cuidado aquando das pesagens do ensaio de capilaridade porque os provetes ainda apresentam um ‘manusear’ muito frágil.

3.6.5.1. Procedimento de ensaio

Para se proceder a uma medição basta retirar o provete do local de secagem e pesá-lo em balança de precisão 0,001g nos intervalos de tempo acima mencionados.

O ensaio termina quando a massa do provete se aproximar da massa do provete seco (início do ensaio de capilaridade), ou quando em vez da massa do provete diminuir começar a aumentar, o que significa que o provete atingiu um equilíbrio com o ambiente da sala onde se realiza o ensaio.



Figura 20 - Ensaio de Secagem.

Concluído o ensaio, depois de todas as pesagens realizadas, a apresentação de resultados para todos os provetes tem como base a expressão de cálculo que se segue:

$$W_t = \frac{m_i - m_o}{m_o} \times 100[\%]$$

em que:

W_t – teor em água, em %

m_i – massa do provete ao fim do tempo t_i , em kg

m_o – massa do provete seco, no instante t_o , em kg

Foi também calculado o índice de secagem, IS, com base na expressão que se segue sugerida por Brito (BRITO, 2009):

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f}$$

em que:

IS – índice de secagem

t_i – tempo de ensaio no instante i , em horas

t_f – tempo final do ensaio, em horas

Q_i – quantidade de água no interior do provete no instante i , em % relativamente à massa seca

$Q_{m\acute{a}x}$ – quantidade de água inicial, em % relativamente à massa seca m_i – massa do provete ao fim do tempo t_i , em kg

A análise de dados resulta no agrupamento de 3 provetes por argamassa por condição de cura de forma ao resultado ser mais representativo. Com base nos valores obtidos foi construído um gráfico que traduz a curva de secagem que relaciona o teor de secagem, em percentagem, em função da raiz quadrada do tempo, em minutos. Por outro lado o índice de secagem permite aferir qual a rapidez de secagem de cada argamassa.

3.6.6. POROSIDADE ABERTA

Os ensaios para determinação da porosidade aberta foram realizados aos 28 dias de idade das argamassas.

Para a realização deste ensaio foram utilizados os 3 topos dos provetes ensaiados à compressão para a mesma idade de caracterização.

Este ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa DEC/FCT–UNL.

Os ensaios para a determinação da porosidade aberta foram realizados com base na norma EN 1936 (CEN, 1999). Uma vez que a presente norma está direccionada para a realização de ensaios em provetes de pedra natural, foram feitas algumas alterações no procedimento de ensaio adoptado para as argamassas de cal (MARTINS, 2010).

3.6.6.1. Procedimento de ensaio

Para a realização deste ensaio começou por se limpar o material que se encontrava solto nos provetes e em seguida fez-se a pesagem dos provetes secos numa balança de precisão de 0,01g [Figura 21_a]. De seguida os provetes foram ‘arrumados’ no exsicador em forma de espiral por forma a maximizar o espaço existente [Figura 21_b].

Este ensaio realizou-se em três fases distintas. Numa primeira fase, depois dos provetes se encontrarem todos dentro do exsicador e de este estar perfeitamente selado, ligou-se uma bomba de vácuo ao exsicador de forma a diminuir a pressão dentro do mesmo até um valor programado (20 Torr). Os provetes ficaram neste ambiente durante 24 horas para eliminar o ar contido nos poros (alteração face à norma).

Numa segunda fase, 24 horas depois, fez-se a introdução da água no exsicador até atingir uma altura um pouco superior à altura da superfície dos provetes.

É importante que a introdução da água seja feita de forma uniforme e pausada e que demore no mínimo 15 minutos.

Os provetes ficaram neste ambiente durante 24 horas.

Finalmente, numa terceira e última fase, 24 horas depois, desligou-se a bomba de vácuo e permitiu-se que o ar saísse de forma gradual do interior do exsicador (devem para isso ser abertas todas as entradas anteriormente seladas). Os provetes estiveram mais uma vez sujeitos a esta nova condição por mais 24 horas - provetes apenas imersos em água sem ambiente em vácuo.

Ao fim das 72 horas de duração do ensaio, retiraram-se os provetes de dentro do exsicador e efectuou-se a pesagem hidrostática através de um dispositivo associado à balança de precisão de 0,01g [Figura 23_a]. Após a pesagem hidrostática, os provetes foram colocados num tabuleiro e entre duas pesagens hidrostáticas efectuou-se uma pesagem dos provetes saturados [Figura 23_b].

3. Materiais e procedimentos adotados no desenvolvimento experimental



Figura 21 - Ensaio de porosidade aberta; pesagem e colocação da amostra em equipamento de ensaio próprio (exsicador).



Figura 22 - Outra perspectiva da "arrumação" dos provetes para ensaio.



Figura 23 - Pesagem hidrostática dos provetes.

Concluído o ensaio, depois de todas as pesagens realizadas, a apresentação de resultados para todos os provetes tem como base a expressão de cálculo que se segue:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100[\%]$$

em que:

P_{ab} – porosidade aberta, em %

m_1 – massa seca do provete, em g

m_2 – massa hidrostática do provete, em g

m_3 – massa saturada do provete, em g

Com base nos valores obtidos foi construído um gráfico que traduz a média de três provetes (representatividade de resultados) da porosidade aberta por argamassa e condição de cura em percentagem.

3.6.7. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL

Os ensaios para determinação da caracterização química, mineralógica e microestrutural decorreram aos 28 dias de idade das argamassas.

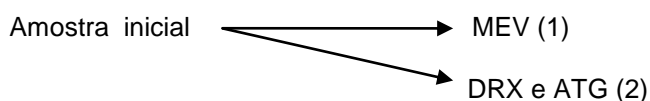
Para a realização deste ensaio foram utilizadas partes integras dos provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão para a mesma idade de caracterização.

Este ensaio foi realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, por um Químico especializado, bolseiro do projecto Metacal.

3.6.7.1. Procedimento de ensaio - Preparação das argamassas para DRX, ATG E MEV

Para a elaboração destes ensaios foi utilizada uma metodologia específica que consiste na separação em fragmentos da amostra para as diferentes técnicas enunciadas acima. Depois de efectuado o ensaio de compressão os restos de cada argamassa são colocados em sacos de plásticos de forma a manter a integridade da amostra. De seguida no laboratório do LNEC é adoptado o seguinte procedimento:

- Fragmento para MEV
- Fragmento para DRX e ATG (amostra global)
- Fragmento para fracção fina (FF)



A amostra inicial começa por ser colocada em estufa ventilada a 40 °C durante um mínimo de 24 horas, sendo de seguida colocada num exsicador o tempo necessário até realizar o ensaio. Este passo justifica-se na medida em que este ensaio, por ser muito minucioso, é também demorado, pelo que não se justifica que depois do processo de secagem a amostra volte a ganhar humidade.

De seguida para a análise MEV retira-se um fragmento da amostra e coloca-se em saco próprio estanque. Para a análise através de DRX são utilizados dois procedimentos diferentes, através de fracção fina e da amostra global. A fracção fina foi obtida através da desagregação de uma porção da amostra com o auxílio de um martelo de borracha, sendo que o movimento do martelo foi apenas de pressão sobre a amostra evitando desta forma movimentos de “pancadas” para não alterar agregados. A amostra global é obtida através da moagem de fragmento da amostra até granulometria inferior a 106 µm; para tal um pequeno pedaço da amostra é moído com o auxílio de um almofariz até atravessar um peneiro de malha inferior a 106 µm; finalmente, depois de peneirada, a amostra coloca-se em saco próprio estanque.

Para a análise de ATG utiliza-se a amostra global acima preconizada.

3.7. ANÁLISE DE DADOS

O tratamento estatístico foi realizado recorrendo ao programa *Microsoft Office Excel* versão 2007. Todo o tratamento de dados envolveu uma análise detalhada através da realização de gráficos que permitiu desta forma visualizar o comportamento dos materiais de forma individualizada.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo está dividido em três partes, onde são apresentados os resultados obtidos pelas argamassas no plano de ensaios inicialmente definido. Na primeira parte são apresentados os resultados dos ensaios experimentais referentes à caracterização das matérias-primas, a segunda parte diz respeito aos resultados obtidos para as argamassas no estado fresco, e por fim, na terceira parte, são apresentados os resultados da caracterização das argamassas no estado endurecido. A apresentação de resultados é feita sob a forma de gráficos e tabelas.

Todos os resultados apresentados, relativos a ensaios de argamassas endurecidas (sub-capítulo 4.3), correspondem à média dos valores obtidos em três provetes de argamassa com a mesma composição.

4.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO MECÂNICA

Os resultados da análise granulométrica realizados de acordo com 3.4.1., correspondentes à média das três amostras para cada uma das areias e para a mistura no traço volumétrico 1 APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30, são apresentados sob a forma de uma curva granulométrica na Figura 24.

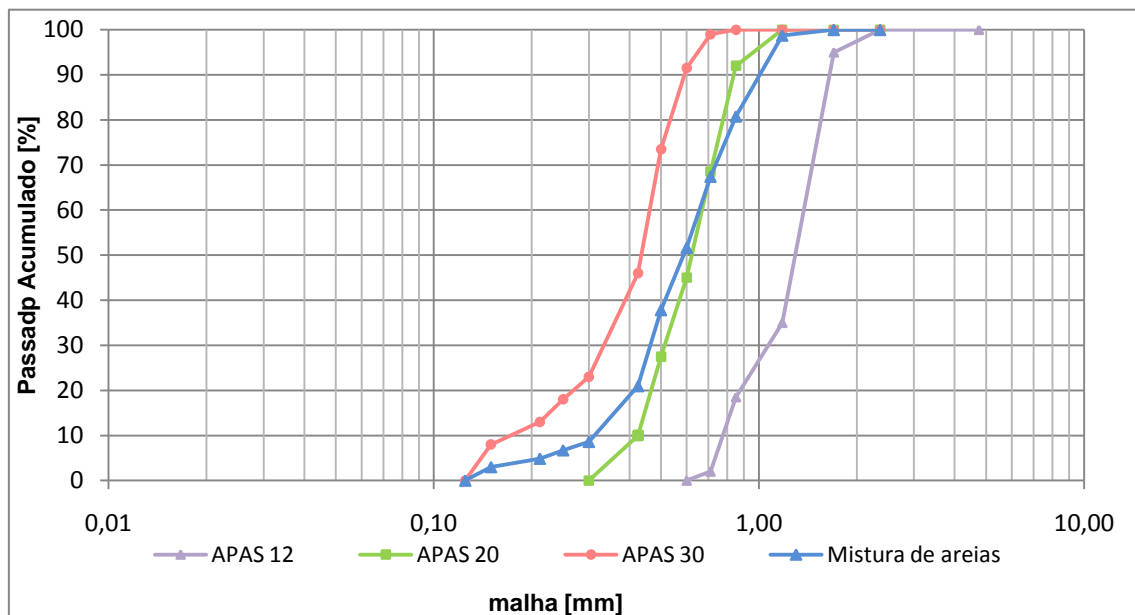


Figura 24 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias.

Da análise efectuada às curvas granulométricas, verifica-se que a máxima dimensão do agregado, que corresponde à máxima dimensão da abertura da malha dos peneiros onde passa uma quantidade de material igual ou superior a 90%, é de 1,18 mm para as areias APAS12 e APAS20 e de 0,71 mm para a areia APAS30. Relativamente à mínima dimensão do agregado, que corresponde à mínima dimensão da abertura da malha dos peneiros por onde passa uma quantidade de material igual ou inferior a 5%, é de 0,71 mm para a areia APAS12, de 0,425 mm para a areia APAS20 e de 0,212 para a areia APAS30. No caso da mistura de areias a máxima dimensão do agregado é de 1,18 mm, igual à das areias APAS 12 e APAS20 e inferior ao da areia APAS30, situando-se assim, entre os valores das areias APAS12, APAS20 e APAS30; relativamente à mínima dimensão esta é de 0,425 mm, igual à da areia APAS20 e situando-se no intervalo de valores das areias APAS12 e APAS30.

Na sequência dos trabalhos foi também determinado o módulo de finura de cada agregado [Quadro 7].

Quadro 7 - Módulo de finura dos agregados.

Módulo de Finura	
APAS 12	3,03
APAS 20	2,55
APAS 30	1,78
Mistura de areias [1 APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30]	5,00

É possível verificar que a areia APAS30 é a que apresenta uma granulometria mais fina, seguindo-se as areias APAS20 e APAS12, respectivamente. A mistura de areias é a que apresenta uma granulometria mais grossa. Este resultado está de acordo com uma simples verificação visual, na medida em que uma análise física da amostra de areias permitiu chegar ao mesmo resultado.

4.1.2. BARIDADE (Ba) DA CAL, METACAU-LINO E AREIAS

O ensaio de baridade foi executado em todos os ligantes e agregados usados no desenvolvimento experimental.

Os valores médios da baridade, determinados como descrito em 3.4.2., foram obtidos a partir de três amostras para cada material, são os constantes no Quadro 8.

Quadro 8 - Baridade dos constituintes das argamassas.

		Baridade média [g/cm ³]
Ligantes	Cal aérea	0,362
	Metacaulino	0,294
Agregados	APAS 12	1,412
	APAS 20	1,405
	APAS 30	1,388
	Mistura areias	1,463

Através da análise do Quadro 8, verifica-se que a mistura das areias tem o maior valor de baridade, seguindo-se as areias APAS12, APAS20 e APAS30, respectivamente. Verifica-se, também, que o metacaulino apresenta um valor inferior de baridade em relação à cal aérea, sendo o que, de entre todas as matérias-primas utilizadas, apresenta o menor valor de baridade.

4.1.3. MASSA DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

Em obra as quantidades de material que se utilizam nas amassaduras de argamassas são definidas em traços volumétricos, contudo em trabalhos laboratoriais, que são mais precisos e meticolosos, a quantidade de matéria-prima a utilizar é definida em massa, de forma que se possam obter valores com maior rigor e permitir a reprodutibilidade entre amassaduras.

As quantidades dos vários materiais utilizados nas argamassas foram obtidas com base na sua baridade.

Todos os traços das argamassas realizadas no âmbito deste estudo são volumétricos de 1:3, de ligante (cal aérea ou cal aérea e metacaulino) e areia. Como referido anteriormente, a areia resulta de uma mistura na proporção volumétrica de 1 de areia APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30.

Nos Quadros 9 e 10 encontram-se as quantidades de matérias-primas necessárias para realizar uma amassadura. Como já foi referido, anteriormente, o trabalho experimental foi desenvolvido em dois locais, no LNEC e na UNL em que os equipamentos utilizados, cuba misturadora mecânica, tinham capacidades diferentes. Em função da capacidade da cuba do misturador no LNEC foi possível obter 6 provetes por amassadura, o que corresponde ao preenchimento de 2 moldes, enquanto que na UNL foi possível obter cerca de 11 provetes, o que equivale ao preenchimento de 3 moldes e meio.

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Quadro 9 - Quantidade das matérias primas utilizadas nas amassaduras [LNEC].

Argamassa	Matérias primas [kg]	
A	Cal aérea	240
	APAS12	733
	APAS20	1094
	APAS30	1080
B	Cal aérea	205
	Metacaulino	20,5
	APAS12	757
	APAS20	1130
	APAS30	1116
C	Cal aérea	170
	Metacaulino	34
	APAS12	777
	APAS20	1160
	APAS30	1146
D	Cal aérea	140
	Metacaulino	42
	APAS12	762
	APAS20	1137
	APAS30	1123
E	Cal aérea	100
	Metacaulino	50
	APAS12	747
	APAS20	1106
	APAS30	1092

Quadro 10 - Quantidade das matérias primas utilizadas nas amassaduras [UNL].

Argamassa	Matérias primas [kg]	
A	Cal aérea	360,00
	APAS12	1100,00
	APAS20	1641,00
	APAS30	1620,00
B	Cal aérea	307,50
	Metacaulino	30,75
	APAS12	1135,50
	APAS20	1695,00
	APAS30	1674,00
C	Cal aérea	255,00
	Metacaulino	51,00
	APAS12	1165,50
	APAS20	1740,00
	APAS30	1719,00
D	Cal aérea	210,00
	Metacaulino	63,00
	APAS12	1143,00
	APAS20	1705,50
	APAS30	1684,50
E	Cal aérea	150,00
	Metacaulino	75,00
	APAS12	1120,50
	APAS20	1659,00
	APAS30	1638,00

4.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

No desenvolvimento experimental deste trabalho a consistência das argamassas foi calculada através do ensaio de consistência por espalhamento. Devido à possibilidade de disparidade de valores motivada pela existência de inúmeros factores que influenciam o ensaio, admitiu-se um intervalo admissível de resultados de acordo com o valor estipulado de espalhamento para as argamassas, que deveria apontar para o valor de 150 +/- 10mm.

A definição da quantidade de água utilizada nas diferentes amassaduras teve em consideração a obtenção de uma trabalhabilidade comparável entre argamassas, que permitisse uma eventual aplicação *in situ*. Registou-se a consistência por espalhamento, de acordo com o descrito em 3.5.4.

Nos Quadros 11 e 12 registam-se as quantidades de água utilizadas em cada argamassa, o espalhamento obtido em cada amassadura e o espalhamento médio obtido no conjunto das amassaduras da mesma argamassa, respectivamente no LNEC e na UNL. Registou-se ainda nos Quadros 13 e 14 o espalhamento obtido por dia de amassadura e o respectivo desvio padrão (dados referentes a amassaduras realizadas no LNEC e na UNL). Constata-se que os valores de consistência de espalhamento obtidos apresentam uma dispersão reduzida, demonstrando influência comparável da água nas argamassas realizadas.

Chama-se, também, atenção para a diferença de valores entre ensaios realizados no LNEC e na UNL para as mesmas argamassas. Esta diferença deve-se ao facto do equipamento de ensaio do LNEC respeitar a norma em vigor, enquanto que o equipamento da UNL ainda está calibrado de acordo com a versão anterior da norma.

Quadro 11 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras [LNEC].

Arg.	Amass.	Relação A/L	Esp. Med. Amass. [mm]	Esp. Med. Arg. [mm]
A	1	2,58	155,0	154,0 ± 5
	2		154,0	
	3		159,0	
	4		146,5	
B	1	3,07	158,0	154,0 ± 3
	2		155,0	
	3		150,0	
	4		154,0	
	5		155,0	
C	1	3,82	159,5	155,0 ± 7
	2		163,0	
	3		148,0	
	4		151,0	
D	1	4,57	153,5	153,0 ± 1
	2		151,5	
	3		154,5	
	4		153,0	

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Arg.	Amass.	Relação A/L	Esp. Med. Amass. [mm]	Esp. Med. Arg. [mm]
E	1	6,40	156,0	153,0 ± 3
	2		152,0	
	3		150,0	
	4		153,0	

Quadro 12 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras [UNL].

Arg.	Amass.	Relação A/L	Esp. Med. Amass. [mm]	Esp. Med. Arg. [mm]
A	1	2,58	141,0	132 ± 4
	2		133,0	
	3		134,5	
	4		130,0	
	5		133,0	
	6		132,5	
	7		126,5	
	8		126,0	
	9		138,0	
	10		130,5	
	11		130,0	
	12		131,5	
B	1	3,07	128,5	127 ± 2
	2		129,5	
	3		127,0	
	4		122,5	
	5		128,0	
	6		128,0	
	7		130,5	
	8		126,0	
	9		124,5	
	10		126,0	
C	1	3,82	138,5	130 ± 5
	2		132,5	
	3		131,5	
	4		135,5	
	5		155,5	
	6		126,0	
	7		128,5	
	8		127,5	
	9		123,0	
	10		122,5	
D	1	4,57	141,5	137 ± 5
	2		138,5	
	3		136,0	
	4		140,5	
	5		128,0	
	6		130,0	
	7		126,5	
	8		127,0	
	9		133,0	
E	1	6,40	134,0	133 ± 1
	2		130,5	
	3		131,0	
	4		132,5	
	5		134,5	
	6		133,5	
	7		133,5	
	8		133,5	
	9		134,0	
	10		133,5	

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Quadro 13 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras por dia/sessão de trabalho [LNEC].

Dia Amass. sessão de trabalho	Esp. Med. Amass. [mm]
1	157 ± 3
2	153 ± 2
3	152 ± 2
4	154 ± 6

Quadro 14 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras por dia/sessão de trabalho [UNL].

Dia Amass. sessão de trabalho	Esp. Med. Amass. [mm]
1	132 ± 5
2	136 ± 4
3	133 ± 1
4	127 ± 2
5	130 ± 4

Quadro 15 - Espalhamento médio obtido nas argamassas por dia/sessão de trabalho [LNEC].

Dia Amass. sessão de trabalho	Arg.	Esp. Med. Arg. [mm]
1	A	155 ± 1
	B	157 ± 2
	C	161 ± 2
2	D	153 ± 1
	E	154 ± 3
3	B	152 ± 3
	C	150 ± 2
	D	154 ± 1
4	E	152 ± 2
	A	153 ± 9
	B	155

Quadro 16 - Espalhamento médio obtido nas argamassas por dia/sessão de trabalho [UNL].

Dia Amass. sessão de trabalho	Arg.	Esp. Med. Arg. [mm]
1	A	134 ± 4
	B	127 ± 3
	C	136 ± 4
2	C	134 ± 2
	D	137 ± 5
3	E	133 ± 1
4	C	126 ± 3
	B	127 ± 2
5	A	130 ± 4
	D	129 ± 3

De acordo com as informações dos quadros anteriores é possível verificar a consistência de valores obtidos para o espalhamento das diferentes argamassas e amassaduras. Verifica-se que os valores esperados para o espalhamento (150 ± 10), foram obtidos para todas as amassaduras realizadas no LNEC (Quadro 13); por outro lado, apesar dos valores da UNL (Quadro 14) não permitirem a comparação directa com o esperado, constata-se a sua enorme consistência sem nunca apresentarem uma variação elevada. Verifica-se ainda uma diferença de espalhamento de cerca de 20 mm entre os vários valores registados com o equipamento normalizado (LNEC) e com o anterior

(UNL). Finalmente ao serem comparados os resultados obtidos por sessão de trabalho é possível verificar, também, que a consistência por espalhamento médio entre todas as argamassas não apresentou variação elevada, ficando-se em $153,9 \pm 3,9$ mm no LNEC e $131,5 \pm 4,7$ mm na UNL.

4.3. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

As resistências mecânicas são dos factores mais utilizados para caracterizar as argamassas, na procura de avaliar a sua compatibilidade com os suportes e a sua durabilidade. Por esta razão, na maioria dos trabalhos de investigação são referidas estas características na caracterização das argamassas.

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi realizada com base nos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão em três pontos, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem, porosidade aberta e através de caracterização química, mineralógica e microestrutural.

4.3.1. AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade das argamassas e fornece uma indicação das suas resistências mecânicas. Ao aumento da deformabilidade das argamassas corresponde uma diminuição do seu módulo de elasticidade.

Os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico foram efectuados, tal como descrito em 3.6.1., aos 28, 60 e 90 dias de idade para cada argamassa e condição de cura. Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram sujeitos durante 24 horas a ambiente controlado à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa em sala própria, a fim de assegurar que atingiam condições mais uniformes. Cada provete foi ensaiado em duas posições distintas e foram realizadas até 6 medições por provete.

No Quadro 17 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico (E), de cada argamassa/condição de cura, respectivo desvio padrão e o número de provetes ensaiados relativos às idades de caracterização de 28, 60 e 90 dias.

Embora não se tenha acesso às condições de temperatura, de humidade relativa, de pluviosidade e de vento, em ambos os ambientes de cura, admite-se que, potencialmente, a cura no denominado ambiente marítimo possa ocorrer com valor de HR mais elevado. A exposição inicial das argamassas, quer seja em ambiente marítimo (M) ou ambiente urbano (U), com a respectiva presença de CO_2 faz acelerar a carbonatação, o que confere endurecimento as argamassas puras de cal, mas em argamassas de cal com metacaulino pode conduzir à carbonatação rápida do hidróxido de cálcio, que deixa de estar apto a reagir com a pozolana.

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Quadro 17 - Módulo de elasticidade dinâmico E aos 28, 60 e 90 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.

Arg.	Tipo de cura	N.º provetes ensaiados aos 28, 60 e 90d	E (28d) [MPa]	E (60d) [MPa]	E (90d) [MPa]
A	M	2*/3/3	3043 ± 163	4130 ± 189	4369 ± 174
	U	3/3/3	3404 ± 149	4700 ± 200	4699 ± 214
B	M	3/3/3	760 ± 67	2977 ± 224	2815 ± 180
	U	3/3/3	608 ± 102	2493 ± 98	2388 ± 98
C	M	3/3/3	549 ± 46	1604 ± 284	1417 ± 77
	M'	-/3/3	-	2018 ± 204	1979 ± 151
	U	2*/3/3	402 ± 28	1682 ± 75	2156 ± 151
D	M	3/3/3	468 ± 92	1065 ± 96	1288 ± 182
	M'	-/3/2	-	1311 ± 36	1241 ± 37
	U	3/3/3	435 ± 93	1426 ± 112	1651 ± 220
E	M	-	-	-	-
	U	2*/2*/-	228 ± 47	745 ± 292	-

O facto de, por vezes, não terem sido ensaiados 3 provetes deve-se a danos ocorridos num dos provetes. As argamassas BU, CM, CU quando foram ensaiadas, aos 60 dias, apresentavam uma das faces bastante deteriorada, este pormenor foi tido em conta neste ensaio no momento de introduzir as dimensões do provete no equipamento de ensaio "Resonance Meter" (ZRM 001). Não existem dados relativos à argamassa EM (28d, 60d e 90d) porque os provetes estavam completamente degradados e desfaziam-se ao serem manuseados. As argamassas CM' e DM' foram executadas no LNEC e sujeitas à cura ambiental marítima, e serviram para testar as diferenças em relação ao método de compactação utilizado (compactação mecânica - UNL vs compactação manual - LNEC). Estas argamassas só foram ensaiadas aos 60 e 90 dias.

Na Figura 25 são apresentados, através de gráficos, os valores do módulo de elasticidade dinâmico das diferentes argamassas e condições de cura; desta forma consegue-se ter uma melhor percepção do incremento dos resultados aos 28, 60 e 90 dias de idade.

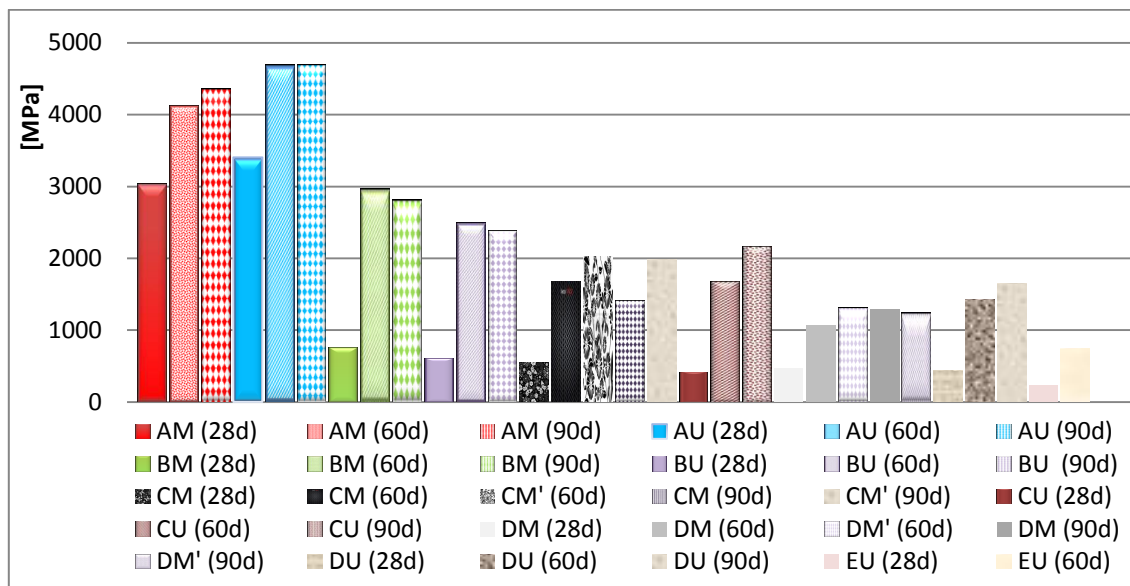


Figura 25 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas.

A visualização gráfica dos resultados permite verificar que as argamassas A são as que apresentam valores mais elevados do E. Estes resultados são desde logo indicativos do comportamento mecânico. Destaca-se ainda o facto de, na argamassa A, os resultados mais

elevados do E serem na cura em ambiente urbano (U); nestas argamassas, tal como seria de esperar, a cura em ambiente marítimo (M) não tem qualquer influência uma vez que da sua composição não faz parte metacaulino.

Nas restantes argamassas (B, C, D e E) verifica-se precisamente o contrário; mais uma vez este facto também está de acordo com o que seria de esperar. Como existe uma substituição crescente da massa de cal por metacaulino nota-se um ligeiro aumento, ainda que reduzido, nas argamassas sujeitas a cura em ambiente marítimo (M) face às mesmas em ambiente urbano (U).

Finalmente, os resultados das argamassas E em qualquer das condições de cura são reveladores da fragilidade dos provetes. Esta situação pode dever-se a três motivos: o traço escolhido para a composição da argamassa não foi o mais correcto; a reacção de hidratação do metacaulino não chegou a ocorrer; os efeitos climáticos (primeiro temperaturas muito elevadas, depois fortes chuvadas) tiveram forte influência nestes resultados uma vez que estes provetes se apresentavam bastante degradados.

Fazendo uma análise particular de cada argamassa e condição de cura, apresentam-se de seguida as Figuras 26 a 30, que facilitam a análise dos resultados do E aos 28, 60 e 90 dias de idade das argamassas A, B, C, D e E, respectivamente.

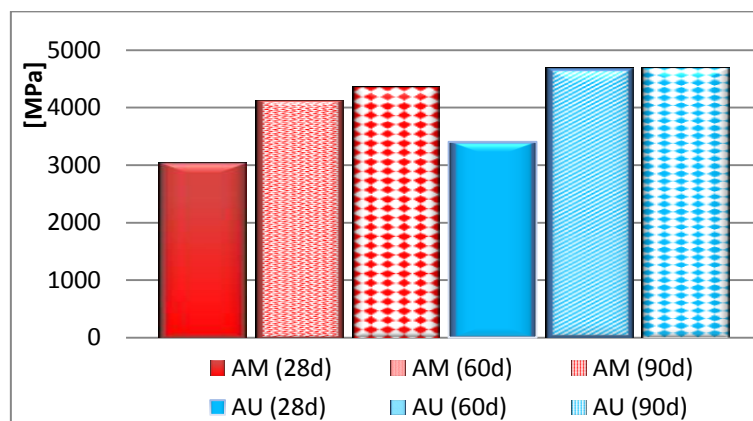


Figura 26 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A.

Relativamente à argamassa A, argamassa de referência, sem Mk, verifica-se que os provetes sujeitos à cura em ambiente urbano (U) tiveram um valor mais elevado do módulo de elasticidade face à cura em ambiente marítimo (M) para todas as idades de caracterização. Destacam-se a evolução dos valores ao longo das idades de caracterização e a diferença para as restantes argamassas e condições de cura cujos valores são sempre mais baixos.

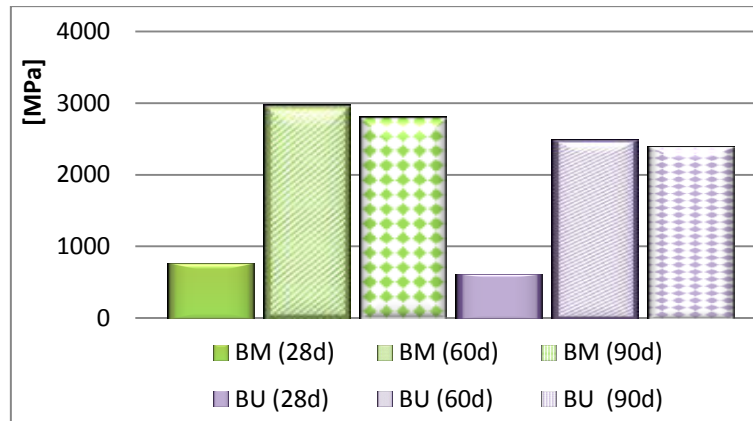


Figura 27 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B.

A argamassa B, com 10% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, era expectável que apresentasse valores do E superiores aos da argamassa A de cal em pó sem metacaulino. Contudo, aos 28 dias de caracterização tal não ocorreu. Primeiro pensou-se que ainda seria cedo para ter ocorrido a reacção pozolânica do metacaulino; porém apesar do aumento muito significativo aos 60 dias de idade, o valor do E continuou a ser inferior ao das argamassas A. Por outro lado verificou-se que os resultados aos 90 dias diminuíram ligeiramente face aos 60 dias, situação que pode ser justificada pelo facto de, aquando da realização dos ensaios aos 60 dias, os provetes aparentarem estar mais húmidos que nas restantes idades de ensaio, o que costuma fazer elevar o valor do E registado.

Nesta argamassa o tipo de cura teve influência nos resultados na medida em que os valores da cura em ambiente marítimo (M) foram superiores aos valores da cura em ambiente urbano (U), situação que surge em conformidade com o esperado.

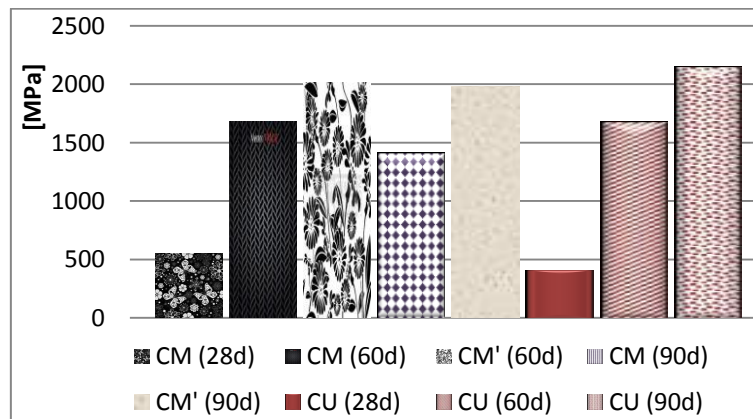


Figura 28 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C.

Da análise da argamassa C, com 20% de Mk em substituição parcial de massa de cal, destacam-se a proximidade de valores entre as diferentes condições de cura, havendo uma ligeira superioridade da cura em ambiente urbano (U) face à cura em ambiente marítimo (M). Nestes

resultados é possível verificar pela primeira vez a influência do tipo de compactação, na medida em que os resultados da argamassa CM' (60 e 90d), compactadas manualmente, são bastante superiores face aos resultados das mesmas argamassas sujeitas a compactação mecânica. Mas também há a realçar o facto dos provetes, embora com idades comparáveis, terem sido executados por vezes em semanas diferentes, em que ocorreram condições climáticas por vezes bastante distintas.

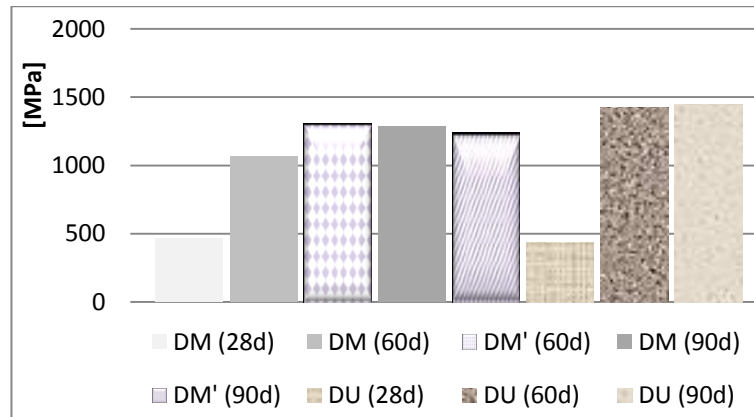


Figura 29 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D.

Os resultados da análise das argamassas D, com 30% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, voltam a comprovar o que foi dito sobre as argamassas C em relação ao tipo de compactação. Mais uma vez, as argamassas DM' (60 e 90d) que foram compactadas manualmente apresentam valores superiores face aos resultados das mesmas argamassas sujeitas a compactação mecânica.

Contudo, tanto os resultados aqui demonstrados (Figura 29), como os da Figura 28 deixam em aberto a questão da influência da humidade característica de ambientes marítimos e que favorece a reacção de hidratação do metacaulino mas que aqui não produziu o efeito esperado.

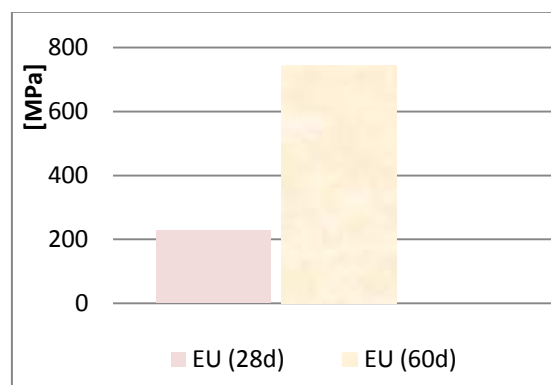


Figura 30 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa E.

A argamassa E, com 50% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, não permitiu uma interpretação da influência das condições de cura porque os provetes que se encontravam em

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

ambiente marítimo, dado a sua elevada degradação, não foram ensaiados. Contudo e uma vez que os únicos valores disponíveis são bastante reduzidos face a todos os outros, suspeita-se que esta argamassa não apresenta uma formulação que propicie a sua utilização.

Os resultados da Figura 31 e da Figura 32 permitem analisar e comparar a influência das diferentes condições de cura entre as argamassas.

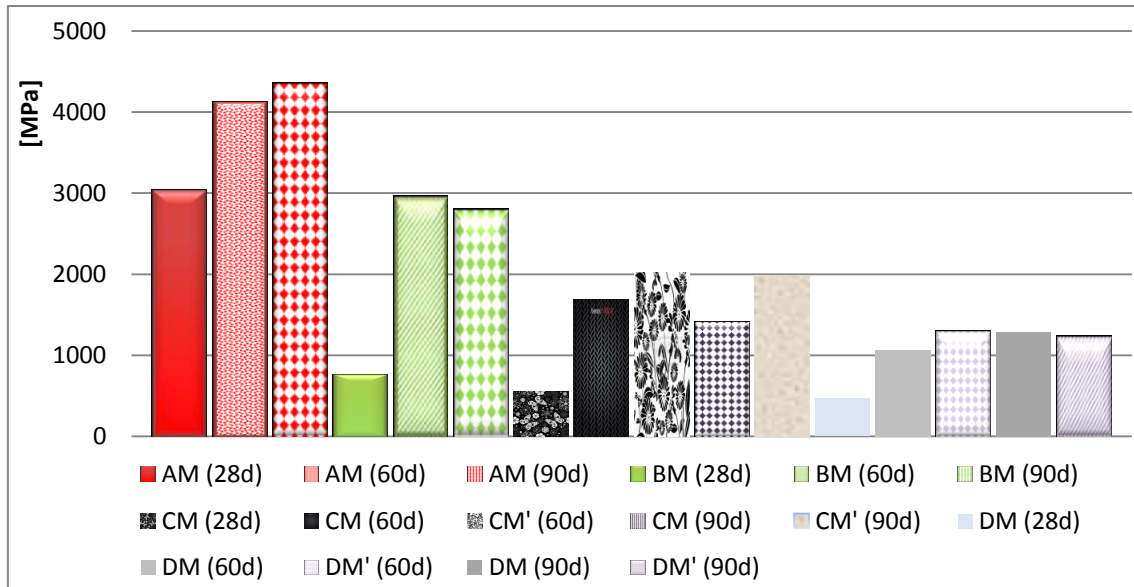


Figura 31 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura M.

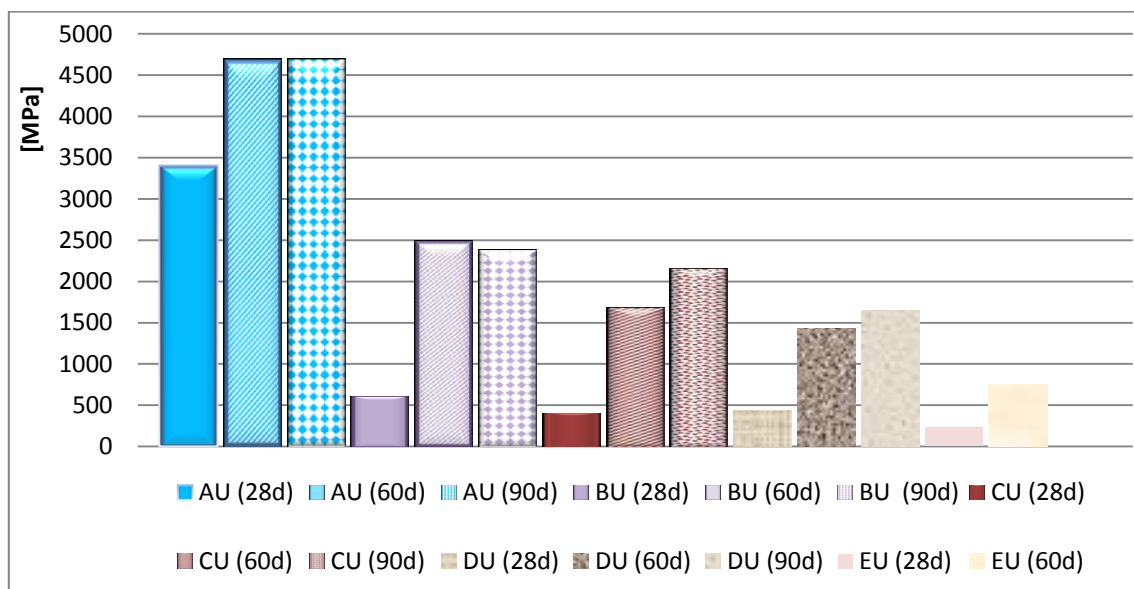


Figura 32 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura U.

Sendo o metacaulino um composto que confere propriedades hidráulicas às argamassas com base em cal aérea, através de uma reacção pozolânica na presença de água, é expectável que um ambiente em que as condições de humidade são potencialmente mais elevadas (ambiente marítimo)

propicie valores mais elevados do E, face a outro ambiente com menos humidade relativa (ambiente urbano). Esta constatação levanta algumas dúvidas e apenas é comprovada para as argamassas B e C. Fica por confirmar também, como referido anteriormente, o nível de humidade relativa registado.

Aprofundando o estudo é possível verificar que existiu uma evolução nos valores do E com a idade de caracterização (28, 60 e 90 dias); contudo existem algumas excepções que podem ser devidas à elevada degradação de alguns provetes. Os resultados a 28 dias são muito reduzidos mas de um modo geral são os esperados visto que as argamassas ainda apresentavam pouco tempo de cura; depois, aos 60 dias, houve um aumento significativo de valores em todas as argamassas e condições de cura; finalmente aos 90 dias, com excepção das argamassas A, todas as outras diminuíram ligeiramente de valores comparativamente aos 60 dias. Aos 90 dias de caracterização seria de esperar novo aumento de valores face aos obtidos a 60 dias, contudo como referido anteriormente, suspeita-se que os valores dos 60 dias estejam ligeiramente elevados devido à elevada humidade que os provetes apresentavam à data de ensaio (tinha chovido recentemente).

Estes resultados estão de acordo com estudos publicados por Veiga (VEIGA, et al., 2010), segundo os quais para argamassas de revestimento com 90 dias de idade os valores recomendados para o E estarão entre os 2000 e 5000 MPa; as excepções a estes estudos são as argamassas D e E que, como se poderá constatar em capítulos posteriores, são as formulações que apresentam mais dúvidas quanto à sua utilização.

Considerando os valores de E também indicativos das resistências mecânicas das argamassas constata-se a contribuição da adição de metacaulino para o incremento dessas resistências aos 60 dias (excepto no caso das argamassas D e E), por razões referidas anteriormente.

Todos os valores de módulo de elasticidade dinâmico (E) de todas as argamassas com excepção das argamassas E revelam-se adequados para argamassas de revestimentos.

4.3.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

Os ensaios de resistência à tracção por flexão foram efectuados, tal como descrito em 3.6.2., aos 28 e 90 dias de idade para cada argamassa e condição de cura. Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram sujeitos durante 24 horas a ambiente controlado à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa em sala própria, a fim de assegurar que atingiam condições mais uniformes.

No Quadro 18 são apresentados os valores médios de resistência à tracção por flexão (R_t), de cada argamassa/condição de cura, o respectivo desvio padrão e o número de provetes ensaiados relativos às idades de caracterização de 28 e 90 dias.

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Quadro 18 – Resistência à tracção por flexão (R_t) aos 28 e 90 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.

Arg.	Tipo de cura	N.º provetes ensaiados aos 28 e 90d	R_t (28d) [MPa]	R_t (90d) [MPa]
A	M	3/3	$0,32 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,02$
	U	2*/3	$0,32 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,02$
B	M	2*/3	$0,14 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,00$
	U	-/3	-	$0,05 \pm 0,01$
C	M	3/3	$0,23 \pm 0,03$	$0,03 \pm 0,01$
	M'	-/3	-	$0,04 \pm 0,00$
	U	-/3	-	$0,03 \pm 0,01$
D	M	3/3	$0,15 \pm 0,10$	$0,02 \pm 0,00$
	M'	-/2	-	$0,02 \pm 0,00$
	U	2*/3	$0,23 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$
E	M	-/-	-	-
	U	-/-	-	-

O facto de, por vezes, não terem sido ensaiados 3 provetes deve-se a danos ocorridos num dos provetes, ou no caso dos ensaios da 1ª semana, realizados no ESTBarreiro/IPS, deve-se ao facto do equipamento não ter registado o valor (provetes AU 28d, BM 28d, BU 28d e CU 28d). Não existem dados relativos à argamassa EM e EU (28d e 90d) porque os provetes estavam completamente degradados e desfaziam-se ao serem manuseados, pelo que se optou por não fazer este ensaio. As argamassas CM' e DM' foram executadas no LNEC e sujeitas à cura ambiental marítima, e serviram para testar as diferenças em relação ao método de compactação utilizado (compactação mecânica - UNL vs compactação manual - LNEC). Estas argamassas só foram ensaiadas aos 90 dias.

Na Figura 33 são apresentados, através de gráficos, os valores de resistência à tracção por flexão em três pontos das diferentes argamassas e condições de cura. Desta forma consegue-se ter uma melhor percepção da variação dos resultados entre os 28 e 90 dias de idade.

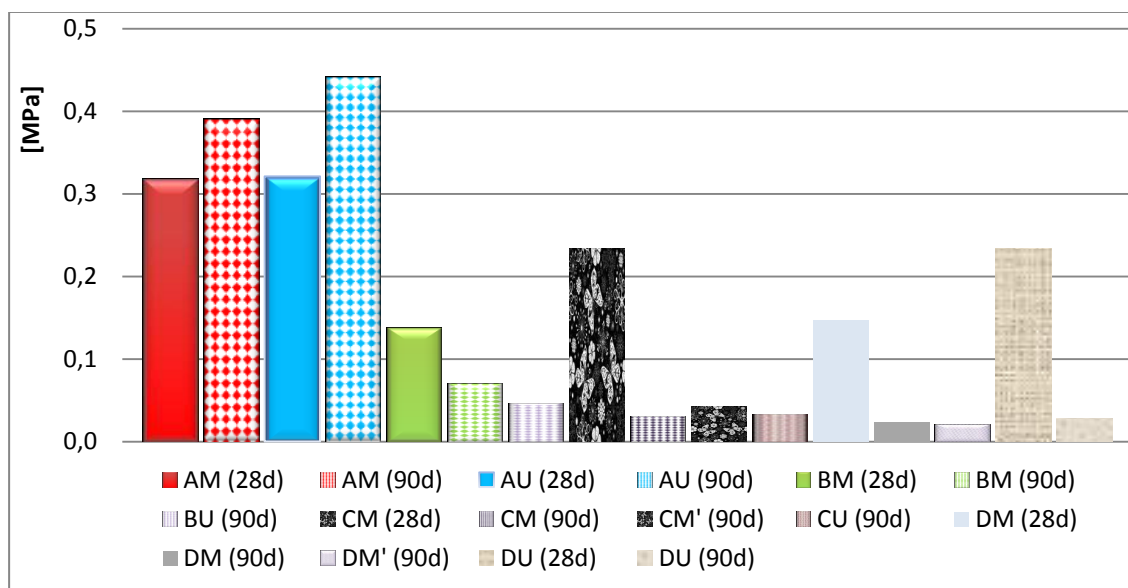


Figura 33 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias de idade das diversas argamassas.

A visualização gráfica dos resultados permite verificar que as argamassas A são as que apresentam valores mais elevados de R_t , resultados estes que estão em conformidade com o exposto no módulo de elasticidade e são indicativos do comportamento geral destas argamassas no estado endurecido. Destaca-se ainda o facto de nas argamassas A os resultados mais elevados, tal

como no módulo de elasticidade, serem na cura em ambiente urbano (U); nestas argamassas, tal como seria de esperar, a cura em ambiente marítimo (M) não tem qualquer influência uma vez que da sua composição não faz parte metacaulino.

Nas restantes argamassas (B, C, D e E) verifica-se que não existe uma coerência nas argamassas com incorporação de metacaulino, ou que pelo menos não ocorreu um padrão de evolução, tal como seria de esperar: aumento do teor de metacaulino; condição de cura; idade de caracterização. Torna-se muito difícil encontrar um padrão na medida em que, aos 28 dias, embora se verifique um aumento dos valores de R_t não foi possível obter todos os dados. Ao fazer a transposição das argamassas B para C e depois para D, verifica-se que ocorreu um aumento de R_t ; contudo não é possível relacionar este aumento com a condição de cura e depois com a idade de caracterização. Aos 90 dias seria de esperar valores mais elevados face à caracterização a 28 dias, nomeadamente nas argamassas em que a percentagem de metacaulino fosse maior e sujeitas a cura em ambiente marítimo (M); no entanto a elevada degradação dos provetes comprometeu este ensaio registando-se inclusivamente um decréscimo de valores face aos obtidos nos ensaios a 28 dias.

De salientar que as argamassas E não foram ensaiadas a qualquer das idades de caracterização porque os provetes estavam muito degradados; tal como na análise do E, suspeita-se que o traço escolhido para a composição da argamassa não seja muito eficiente; a reacção de hidratação do metacaulino provavelmente não chegou a ocorrer e os efeitos climáticos (primeiro temperaturas muito elevadas, depois fortes chuvadas) podem ter tido forte influência nestes resultados.

Fazendo uma análise particular de cada argamassa e condição de cura, apresentam-se de seguida as Figuras 34 a 37, que facilitam a análise dos resultados da resistência à tracção aos 28 e 90 dias de idade das argamassas A, B, C, D e E, respectivamente.

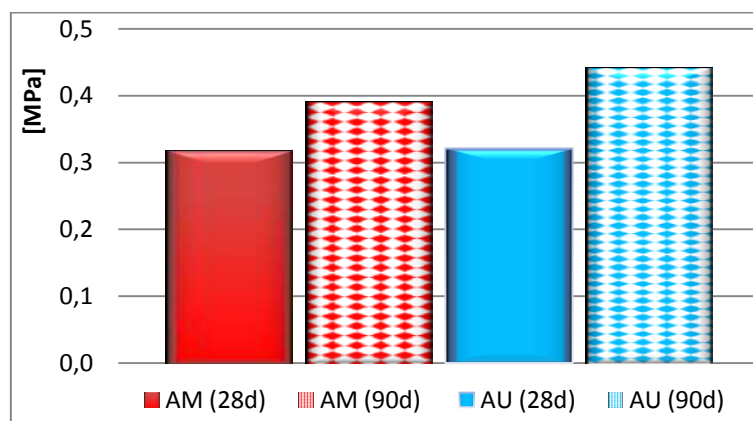


Figura 34 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa A.

Relativamente à argamassa A, argamassa de referência, sem Mk, verifica-se que existe uma grande proximidade de valores entre as duas condições de cura, situação que dada a ausência de metacaulino na composição destas argamassas era expectável. Tal como seria de esperar houve um

aumento, ainda que ligeiro, dos valores ao longo das idades de caracterização da resistência à tracção.

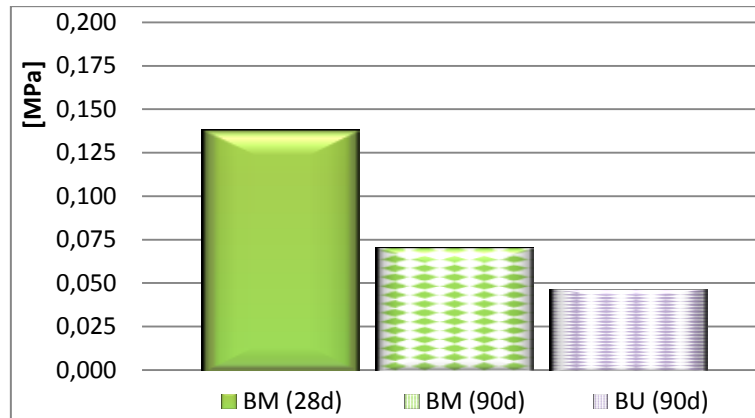


Figura 35 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa B.

A argamassa B, com 10% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, não só era expectável que apresentasse valores mais elevados de R_t face aos da argamassa A como também seria de esperar uma evolução com a idade de caracterização e a influência do ambiente marítimo (M) comparativamente ao ambiente urbano (U). Não se verificou a evolução com a idade nem com o teor de metacaulino. Esta situação pode estar relacionada com os primeiros dias de cura em que se registaram temperaturas muito altas e humidades baixas, situação que não favorece a reacção de hidratação do metacaulino; de seguida ocorreram duas chuvadas particularmente fortes (inclusive com granizo) que degradaram muito os provetes. A destruição dos provetes foi de tal ordem que em alguns casos verificou-se a perda de quase 2cm na face exposta directamente à chuva. O provete "BU 28d" não se encontra documentado porque o equipamento de ensaio não conseguiu registar o valor de rotura. Verificou-se, no entanto, aos 90 dias uma ligeira melhoria da resistência em ambiente marítimo, possivelmente devido à maior capacidade de hidratação da mistura cal/metacaulino.

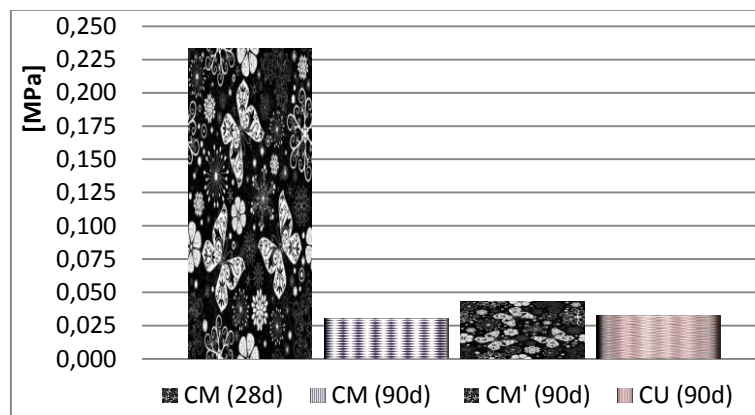


Figura 36 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa C.

Da análise da argamassa C, com 20% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, em primeiro lugar destaca-se o valor relativamente elevado aos 28 dias para a cura em ambiente marítimo (M), não sendo porém possível registar a comparação com a cura urbana devido à falta de sensibilidade do equipamento de ensaio utilizado. Outra situação importante a reter é a da proximidade de valores entre as diferentes condições de cura aos 90 dias de caracterização, havendo uma ligeira superioridade da cura em ambiente urbano (U) face à cura em ambiente marítimo (M); contudo ao contrário do que seria de esperar não houve um aumento de valores de R_t com a idade de caracterização. Uma justificação para esta situação está documentada no comentário anterior sobre as argamassas B. Nestes resultados é possível verificar a influência do tipo de compactação, argamassas “CM 90d” e “CM’ 90d” compactadas mecânica e manualmente, respectivamente.

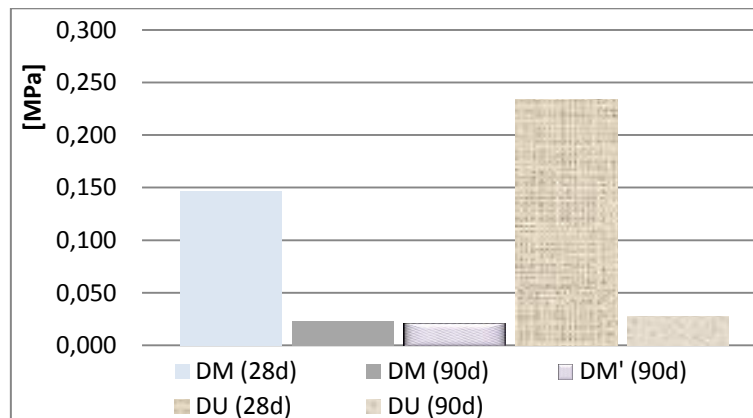


Figura 37 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa D.

Os resultados nesta análise, referentes às argamassas D, com 30% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, voltam a comprovar o que foi dito sobre as argamassas C em relação ao tipo de compactação. Mais uma vez, as argamassas “DM’ 90d”, que foram compactadas manualmente, apresentam valores superiores, pese embora a diferença seja muito reduzida, face aos resultados das mesmas argamassas sujeitas a compactação mecânica “DM 90d”.

Os resultados da Figura 38 e da Figura 39 permitem analisar e comparar as diferentes argamassas, por tipo de cura a que foram sujeitas.

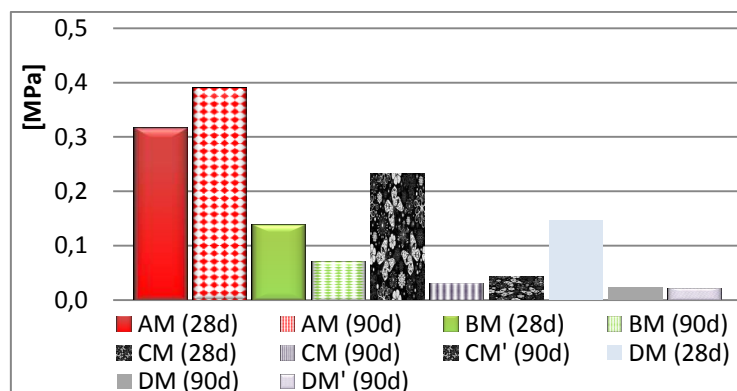


Figura 38 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura M.

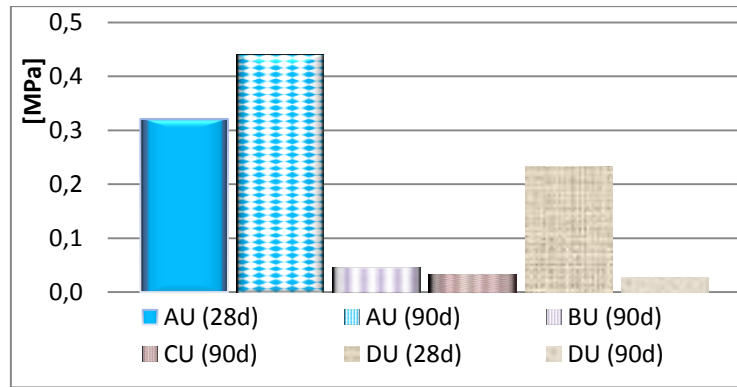


Figura 39 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura U.

Os resultados aqui demonstrados (Figura 38 e Figura 39) não são conclusivos visto não existir um padrão de caracterização. Em alguns casos ocorre uma evolução nos valores com a substituição crescente do teor de metacaulino nas argamassas B, C e D, verificando-se inclusive a influência do ambiente marítimo “BM 28d” face a “CM 28d”; contudo a degradação elevada dos provetes não permitiu a extrapolação desta ocorrência para idades de caracterização mais avançadas, deixando em aberto a questão da influência da humidade e de qual a melhor proporção na substituição de massa de cal por metacaulino na composição das argamassas.

A argamassa E, com 50% de Mk, em substituição parcial de massa de cal, não permitiu uma interpretação da influência das condições de cura porque os provetes, dada a sua elevada degradação, não foram ensaiados a nenhuma idade. Suspeita-se que esta argamassa não apresenta uma formulação que propicie a sua utilização corrente.

Em resumo, constata-se que os resultados a 28 dias são inconclusivos (muito devido a deficiências de equipamento) e que a comparação com a caracterização a 90 dias está por vezes comprometida pelo elevado estado de degradação dos provetes. Ainda assim é possível verificar que existiu uma evolução nos valores do R_t com a idade de caracterização (28, e 90 dias), para a argamassa A, tendo sido esta a que apresentou sempre melhor resistência. Por esse facto, nestas condições de cura, a substituição de massa de cal aérea pelo metacaulino utilizado e nas percentagens utilizadas, pode não ser vantajosa.

Segundo Veiga (VEIGA, et al., 2010), para argamassas de revestimento, aos 90 dias de idade, os valores de resistência à tracção por flexão em três pontos devem-se situar entre os 0,2 e os 0,7 MPa. Através dos resultados obtidos a única argamassa que satisfaz esta condição é a A; contudo aos 28 dias algumas formulações já apresentam valores satisfatórios pelo que seria de esperar que aos 90 dias, caso as condicionantes verificadas não tivessem ocorrido, apresentassem valores ainda mais de acordo com o estudo citado (relembra-se que os provetes ensaiados a 28 dias foram realizados e colocados em exposição natural posteriormente à ocorrência de condições climáticas extremas a que os ensaiados a 90 dias – realizados antes - estiveram expostos), Fica assim por avaliar a influência que as condições de cura extremas que ocorreram tiveram nas

características das argamassas. Tal situação poderá vir a ser avaliada com base na caracterização de argamassas idênticas sujeitas a condições de cura distintas mas estáveis.

4.3.3. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram efectuados, tal como descrito em 3.6.3., aos 28, 60 e 90 dias de idade para cada argamassa e condição de cura, tendo os ensaios a 28 e 60 dias sido realizados sobre metades dos mesmos provetes e a 90 dias sobre metades de outros provetes (realizados e expostos em datas distintas). Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram sujeitos durante 24 horas a ambiente controlado à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa em sala própria, a fim de assegurar que atingiam condições mais uniformes.

No Quadro 19 são apresentados os valores médios de resistência à compressão (R_c), de cada argamassa/condição de cura, o respectivo desvio padrão e o número de provetes ensaiados relativos às idades de caracterização de 28, 60 e 90 dias.

Quadro 19 – Resistência à tracção por flexão (R_c) aos 28, 60 e 90 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.

Arg.	Tipo de cura	N.º provetes ensaiados aos 28, 60 e 90d	R_c (28d) [MPa]	R_c (60d) [MPa]	R_c (90d) [MPa]
A	M	3/3/3	$0,54 \pm 0,02$	$1,05 \pm 0,11$	$1,07 \pm 0,03$
	U	2*/2*/3	$0,34 \pm 0,20$	$0,79 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,01$
B	M	3/3/3	$0,22 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,02$
	U	2*/3/3	$0,21 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,04$	$0,14 \pm 0,01$
C	M	3/3/3	$0,30 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,03$	$0,17 \pm 0,02$
	M'	-/-/3	-	-	$0,22 \pm 0,02$
	U	-/3/3	-	$0,11 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,02$
D	M	3/3/3	$0,27 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,02$
	M'	-/-/3	-	-	$0,15 \pm 0,01$
	U	3/3/3	$0,20 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,04$
E	M	3/3/3	$0,06 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,00$
	U	-/3/3	-	$0,06 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,01$

O facto de, por vezes, não terem sido ensaiados 3 provetes deve-se a danos ocorridos num dos provetes, ou no caso dos ensaios da 1ª semana, realizados no ESTBarreiro/IPS, deve-se ao facto do equipamento não ter registado o valor (provetes AU 28d, BU 28d e CU 28d). Não existem dados relativos à argamassa "EU 28d" porque os provetes estavam completamente degradados e desfaziam-se ao serem manuseados, pelo que se optou por não fazer este ensaio. As argamassas CM' e DM' foram executadas no LNEC e sujeitas à cura ambiental marítima, e serviram para testar as diferenças em relação ao método de compactação utilizado (compactação mecânica - UNL vs compactação manual - LNEC). Estas argamassas só foram ensaiadas aos 90 dias.

Na Figura 40 são apresentados, através de gráficos, os valores de resistência à compressão das diferentes argamassas e condições de cura; desta forma obtém-se melhor percepção da variação dos resultados entre os 28, 60 e 90 dias de idade.

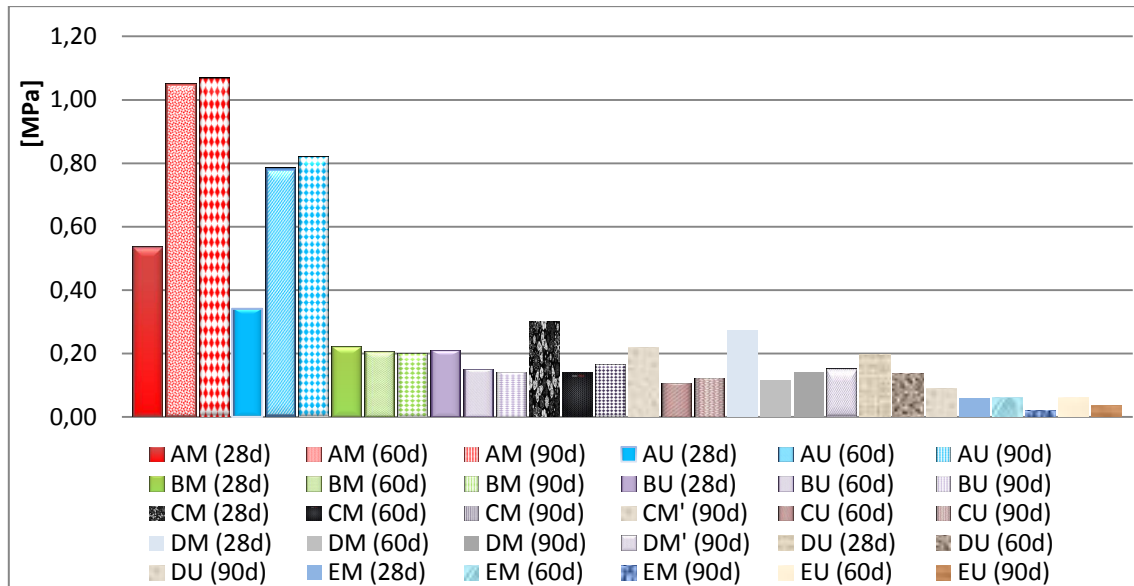


Figura 40 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas.

A visualização gráfica dos resultados permite verificar que as argamassas A são, também neste ensaio de R_c , as que apresentam valores mais elevados. Estes resultados estão em conformidade com os ensaios realizados anteriormente (módulo de elasticidade e resistência à tracção) e são indicativos do comportamento geral destas argamassas no estado endurecido.

Nas restantes argamassas (B, C, D e E) verifica-se que não existe uma coerência nas argamassas com incorporação de metacaulino, ou que pelo menos não ocorreu um padrão de evolução, tal como seria de esperar: aumento do teor de metacaulino; condição de cura; idade de caracterização. Contudo nestas argamassas é possível verificar uma proximidade de valores independentemente da percentagem de metacaulino que possuem e da condição de cura.

Aos 90 dias seria de esperar valores mais elevados face à caracterização a 28 e 60 dias, nomeadamente nas argamassas em que a percentagem de metacaulino fosse maior e sujeitas a cura em ambiente marítimo (M). Contudo aparentemente não ocorreram as reacções pozolânicas que eram expectáveis e, como os provetes não adquiriram resistência, a sua elevada degradação comprometeu este ensaio.

Fazendo uma análise particular de cada argamassa e condição de cura, apresentam-se de seguida as Figuras 41 a 45, que facilitam a análise dos resultados de resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de idade das argamassas A, B, C, D e E, respectivamente.

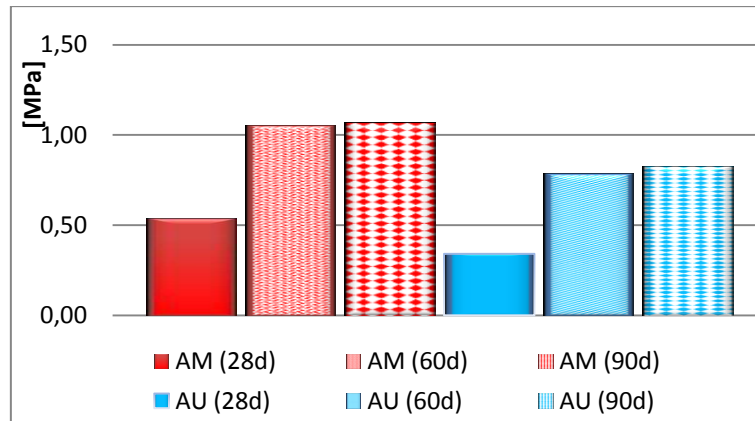


Figura 41 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A.

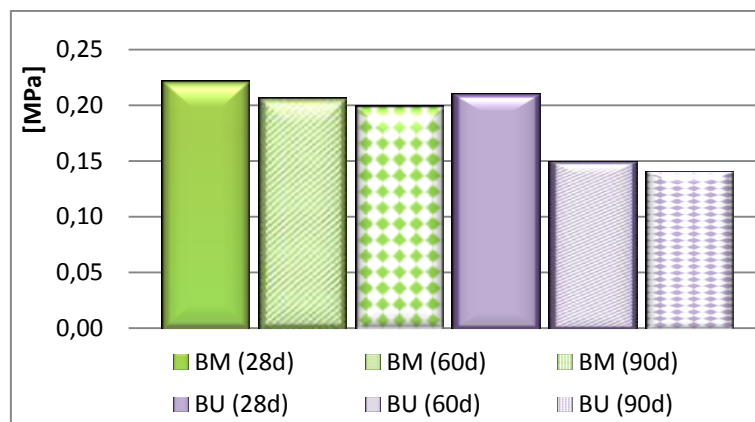


Figura 42 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B.

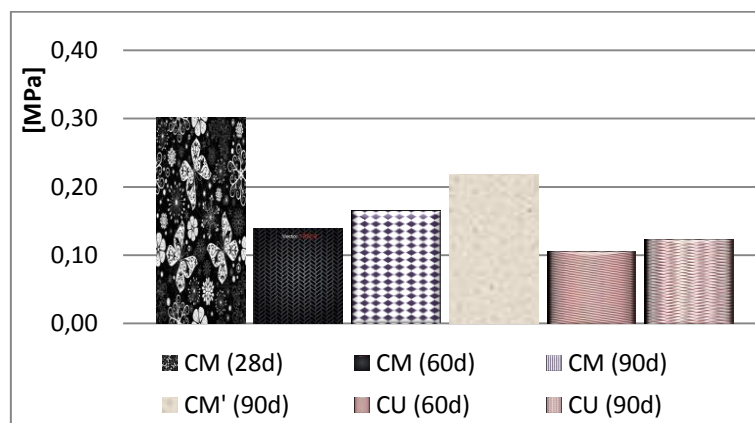


Figura 43 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C.

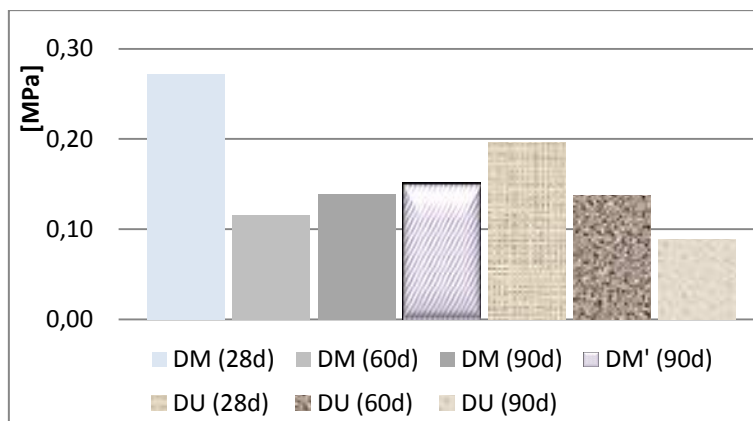


Figura 44 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D.

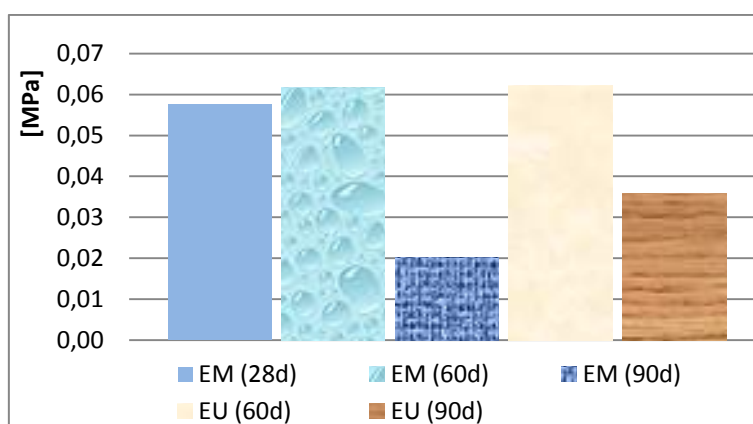


Figura 45 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa E.

A visualização gráfica dos resultados não permite identificar um padrão na evolução dos valores obtidos. Contudo é importante verificar que para as argamassas A, as únicas que preservaram a dimensão inicial dos provetes, apesar de ter havido um aumento de valores dos 28 para os 60 dias de caracterização tal situação não ocorreu aos 90 dias, sendo que entre os 60 e os 90 dias os valores são muito semelhantes. Já as argamassas B apresentam uma gama de valores de caracterização sempre muito próxima embora, mais uma vez, a degradação dos provetes possa ser a causa de não se verificar um aumento nas resistências com a idade de caracterização, pese embora permita constatar a influência do ambiente marítimo (M) face ao ambiente urbano (U).

Nas restantes argamassas (C, D e E) verifica-se a influência da cura marítima na idade de caracterização aos 28 dias; contudo não foi possível uma análise mais detalhada uma vez que os resultados a 60 e 90 dias estão seriamente condicionados pela elevada degradação que os provetes apresentavam na altura dos ensaios. Inclusivamente nas argamassas com a composição E os valores de caracterização foram de tal forma baixos que a sua adequabilidade para argamassa de revestimentos deixa sérias dúvidas.

Os resultados da Figura 46 e da Figura 47 permitem analisar e comparar as diferentes argamassas, por tipo de cura a que foram sujeitas.

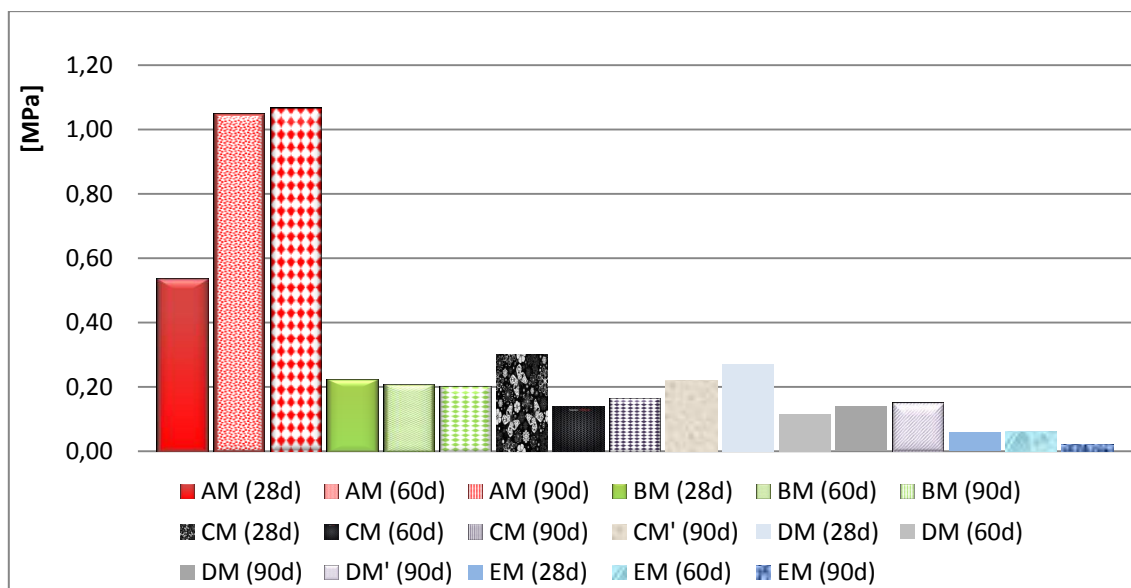


Figura 46 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura M.

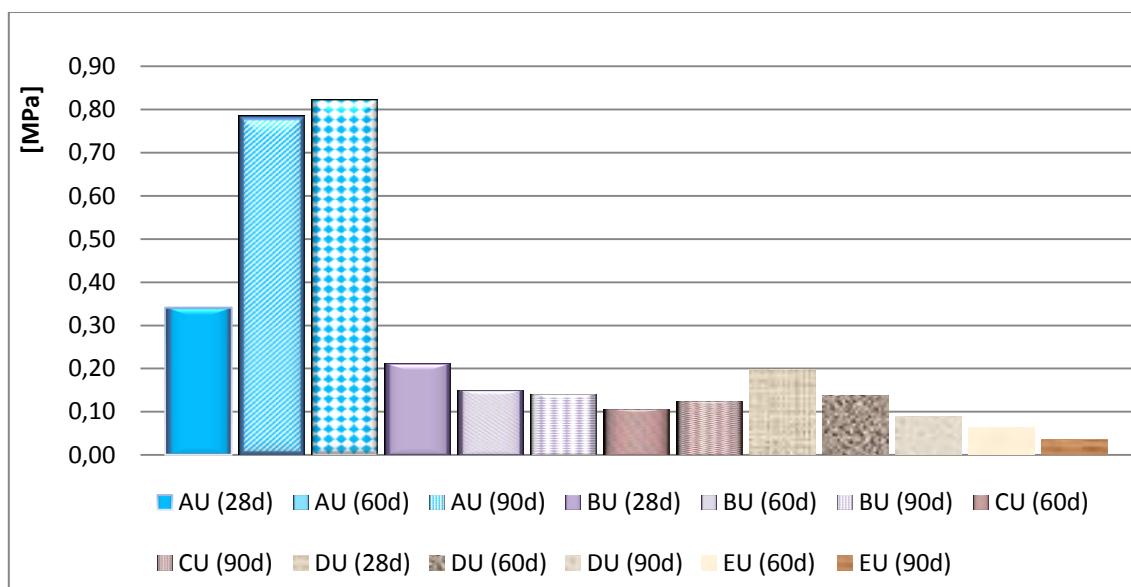


Figura 47 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura U.

Os resultados aqui demonstrados (Figura 46 e Figura 47), permitiram aferir a vantagem da cura em ambiente marítimo (M) face à cura em ambiente urbano (U). Contudo a diferença de valores é muito ligeira e não permite concluir que existiu um padrão de caracterização. Em alguns casos ocorreu uma diminuição na gama de valores da R_c com a caracterização a idades mais avançadas; porém, dada a elevada degradação dos provetes, esta situação era expectável.

A evolução que seria de esperar e a influência da exposição marítima ficaram comprometidas com a deterioração precoce dos provetes, embora em alguns casos ainda se manifeste.

4.3.4. AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram efectuados, tal como descrito em 3.6.4., aos 28 dias para provetes inteiros. Verificou-se a ocorrência de uma degradação significativa nos provetes especificamente efectuados para a realização deste ensaio a várias idades, o que inviabilizou a sua utilização para ensaio aos 90 dias. Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram colocados durante 48 horas em estufa climática com temperatura controlada de 60°C a fim de atingirem massa constante (variação de massa em 24h inferior a 0,1%).

Este ensaio permite traçar as curvas de absorção de água por capilaridade, através das quais se pode calcular o valor assintótico (VA) e o coeficiente de capilaridade (CC). Este ensaio é de extrema importância quando se pretende avaliar o comportamento das argamassas face à acção da água da chuva e aos ciclos gelo-degelo.

Na Figura 48 à Figura 51 apresenta-se a evolução da absorção capilar ao longo do tempo de ensaio de forma individualizada por argamassa (A a D, uma vez que os provetes da argamassa E ficaram destruídos). Os valores do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico são os apresentados no Quadro 20.

A análise dos resultados será efectuada através da verificação do andamento das curvas de absorção capilar, após as quais se fará uma análise mais detalhada em termos do valor assintótico e do coeficiente de capilaridade.

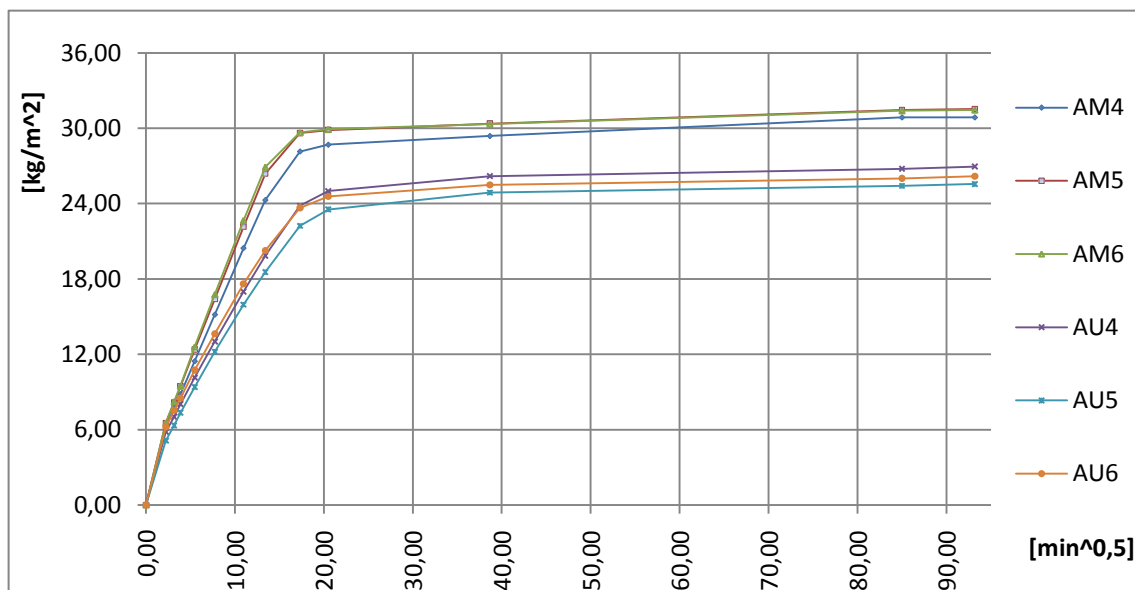


Figura 48 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa A.

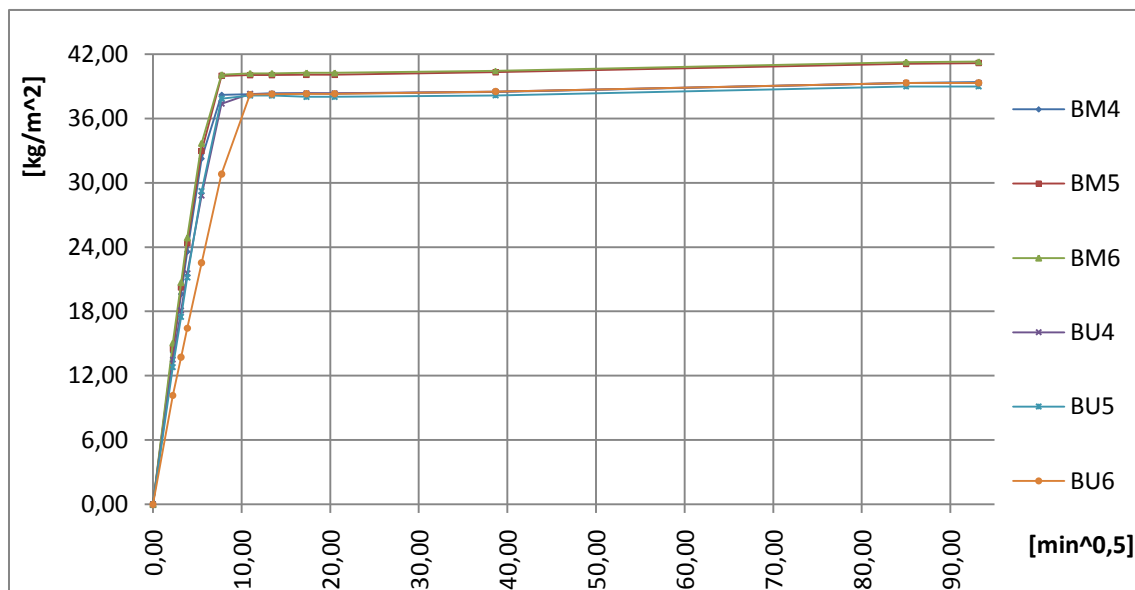


Figura 49 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa B.

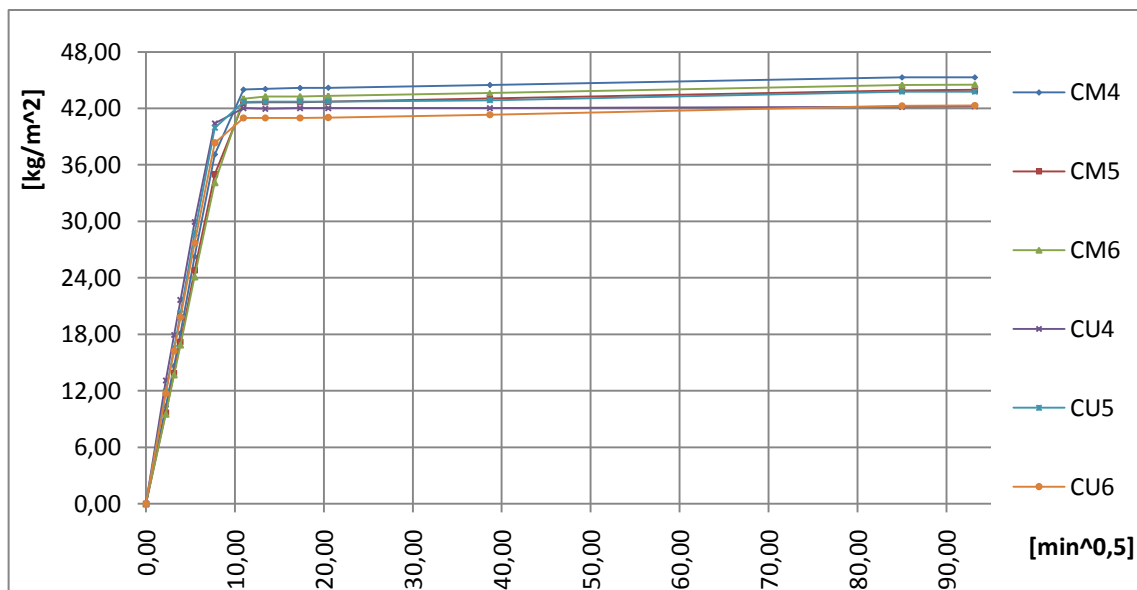


Figura 50 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa C.

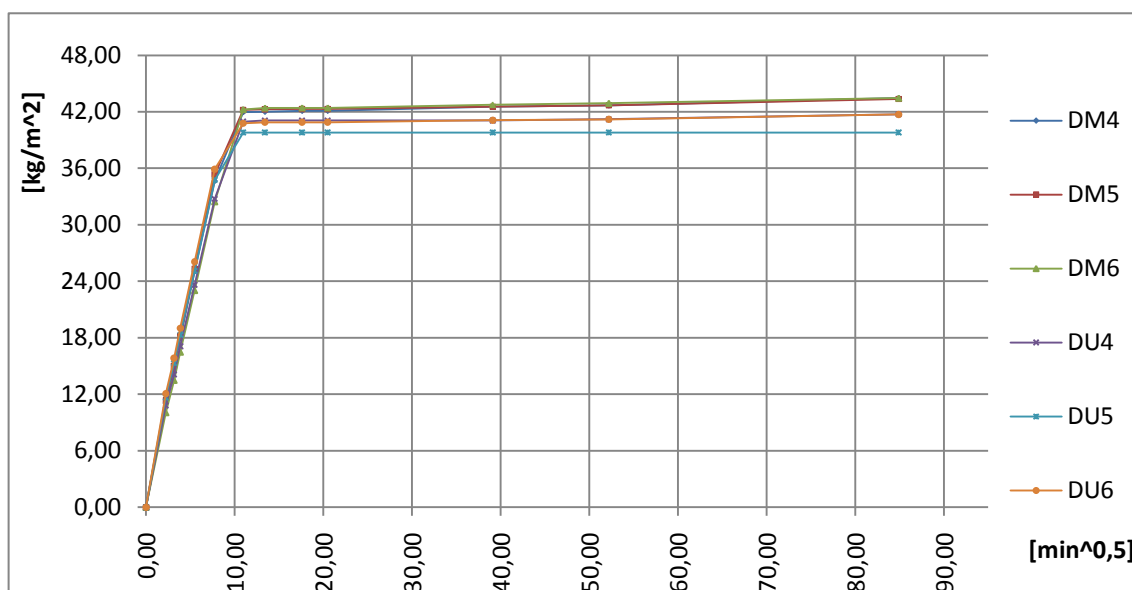


Figura 51 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias da argamassa D.

Do exposto nos gráficos anteriores é possível verificar que as argamassas só de cal aérea, argamassas A, são as que apresentam maior dispersão de valores de absorção entre as diferentes curas face às restantes argamassas. Por outro lado são as argamassas A que apresentam menores valores de absorção capilar.

Relativamente às restantes argamassas (B, C e D) é possível constatar que todas apresentam uma dispersão muito reduzida de valores de absorção capilar, não só entre diferentes curas, como também entre si. Contudo não é possível identificar um padrão: enquanto que nas argamassas B e C se verificam menores valores de absorção para as curas em ambiente marítimo (M), tal não ocorre para a argamassa D, verificando-se precisamente o contrário.

De forma a fornecer uma perspectiva global dos valores assintóticos e dos coeficientes de capilaridade, apresentam-se nas Figura 52 e 53, em forma de gráfico, os valores médios obtidos para as várias argamassas.

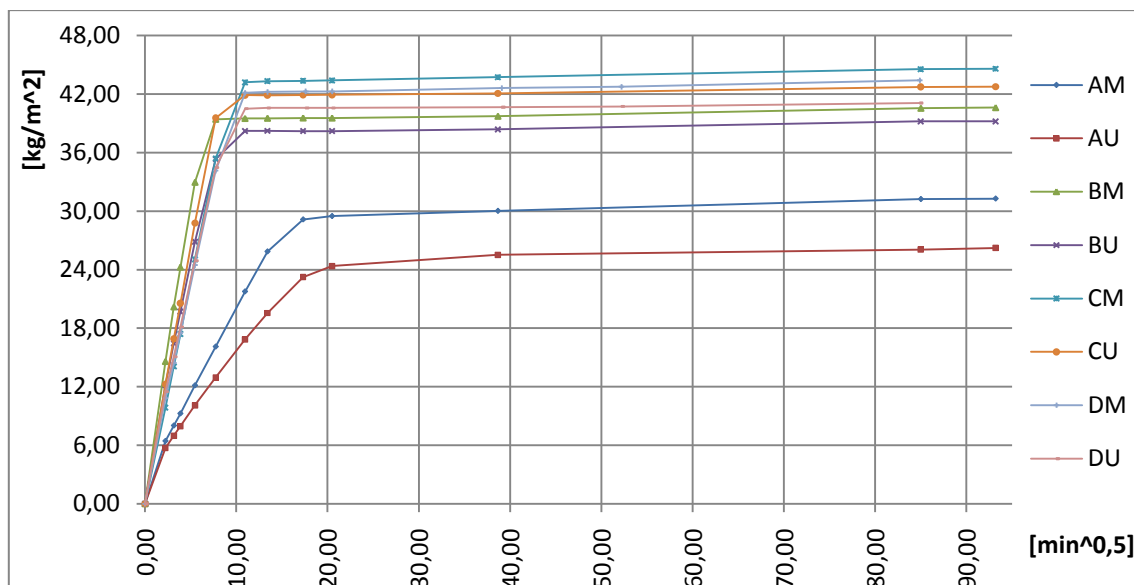


Figura 52 - Curvas de absorção de água por capilaridade média aos 28 dias de todas as argamassas.

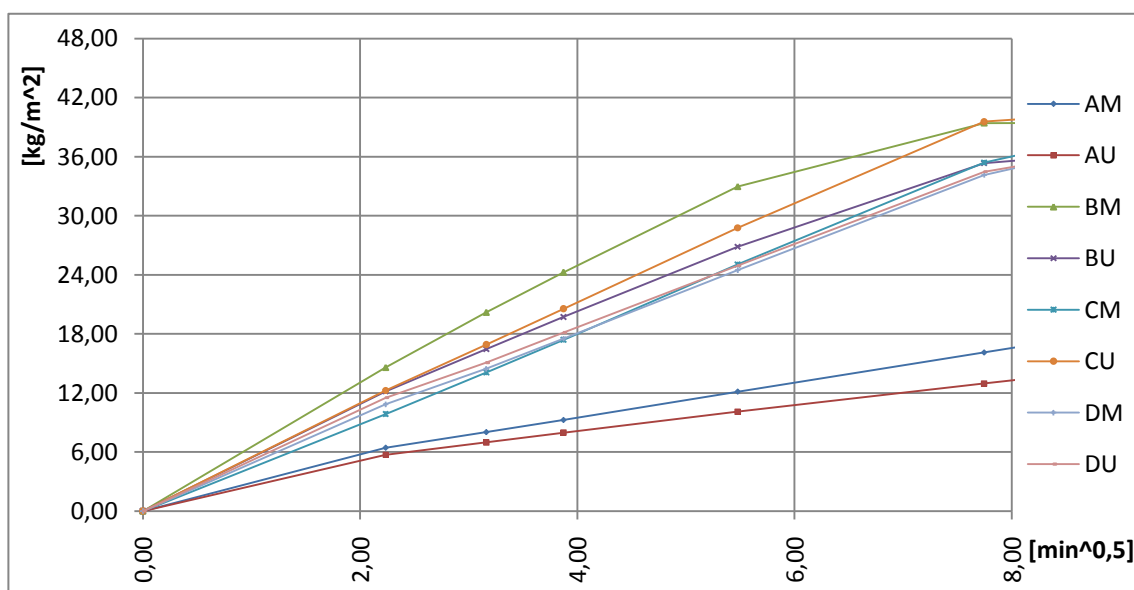


Figura 53 - Pormenor da absorção de água por capilaridade média inicial de todas as argamassas.

Da análise efectuada às Figuras 52 e 53, verifica-se que a absorção capilar inicial das argamassas ensaiadas é rápida. É conhecido que a absorção capilar inicial de argamassas com base em cal aérea é mais rápida que a de argamassas de cimento (Rato, 2006).

Verifica-se que a absorção capilar nas argamassas com metacaulino é mais rápida que nas argamassas só de cal, cujo ritmo de absorção inicial é mais lento até à fase de estabilização.

O troço das curvas de absorção capilar em que o processo se faz de uma maneira mais rápida vai permitir calcular o coeficiente de capilaridade. Para a maioria das argamassas este período decorre até à terceira hora de ensaio. O objectivo do gráfico da Figura 53 é precisamente o de facilitar

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

esta leitura e dar uma noção da evolução do ensaios até ao momento em que as argamassas atingiram o equilíbrio (curva de inflexão), daí a forma mais pormenorizada dos valores com escala temporal mais reduzida e aumentada.

O troço das curvas de absorção capilar em que se verifica a estabilização dos valores é o que permite calcular o valor assintótico (Quadro 20 e Figura 54), ou seja, quando a velocidade de absorção de água pelos provetes começa a ser muito reduzida e eles estão prestes a atingir a saturação.

Quadro 20 - Valor assintótico e coeficiente de capilaridade aos 28 dias de idade das argamassas.

Arg.	Tipo de cura	VA [kg/m ²]	CC [kg/m ² .min ^{1/2}]
A	M	31,28	1,304
	U	26,23	0,976
B	M	40,61	3,349
	U	39,20	3,126
C	M	44,60	3,446
	U	42,76	3,682
D	M	43,42	3,144
	U	41,08	3,096
E	M	-	-
	U	-	-

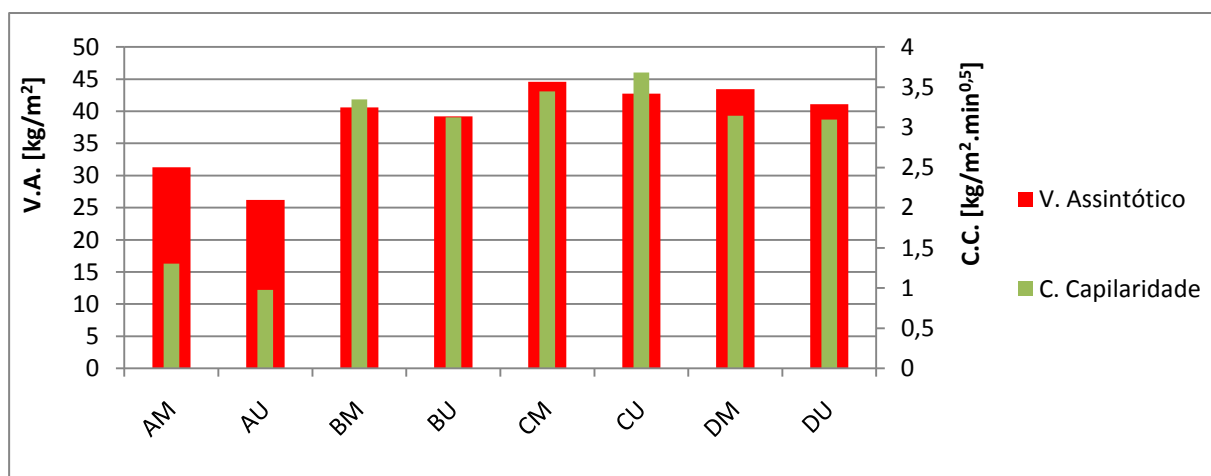


Figura 54 - Absorção e água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de idade.

O coeficiente de capilaridade (CC), (Quadro 20 e Figura 54), é dado pela inclinação do primeiro troço linear recto da curva de absorção capilar, expresso em kg/m².min^{0.5} e traduz a velocidade de absorção de água nos instantes iniciais. Este parâmetro foi calculado tomando como referência os valores de ensaio correspondentes ao intervalo de valores entre os 5 e os 60 minutos.

4.3.5. AVALIAÇÃO DA SECAGEM

Como referido no sub-capítulo 3.6.5. os ensaios de secagem realizaram-se imediatamente a seguir aos ensaios de absorção de água por capilaridade. Durante este processo, os provetes

estiveram acondicionados numa sala com ambiente controlado à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa.

Da Figura 55 à Figura 58 apresentam-se os valores médios das curvas de secagem dos provetes das diferentes argamassas, consoante o tipo de cura a que foram sujeitas. Na Figura 59 são apresentados os valores médios de todas as argamassas, bem como, no Quadro 21 e na Figura 60, os valores referentes ao índice de secagem.

Através da análise da Figura 55, da argamassa A de cal em pó sem metacaulino, verifica-se que, independentemente da condição de cura, todos os provetes apresentaram um comportamento muito semelhante.

Para as restantes argamassas (B, C e D) em que houve uma crescente substituição da massa de cal por metacaulino (Figuras 56, 57 e 58), verifica-se que os provetes sujeitos ao processo de cura marítimo (M) tiveram um processo de secagem mais lento. Contudo todas as argamassas e condições de cura apresentam relativamente grande coesão nos resultados de secagem.

Uma análise mais detalhada da Figura 59 irá permitir distinguir as diferenças entre as argamassas de referência, sem adição de metacaulino, e as restantes argamassas.

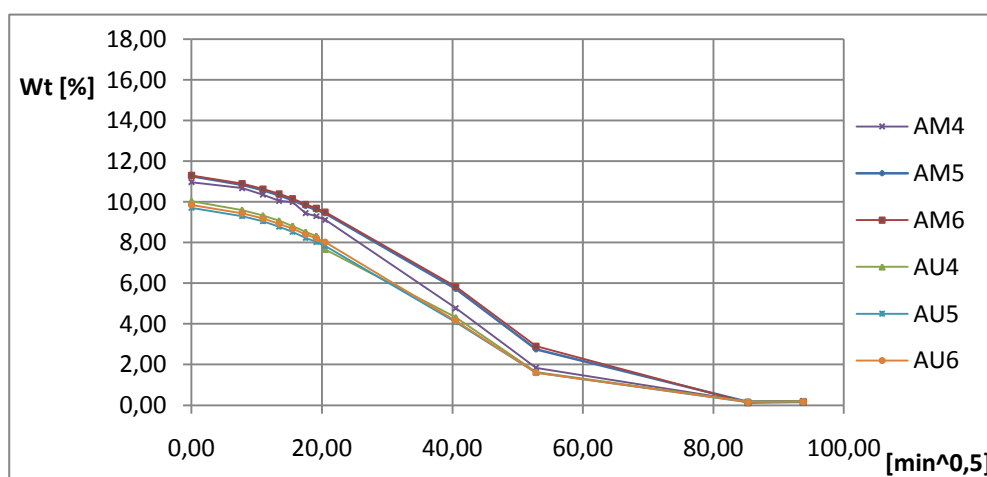


Figura 55 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa A.

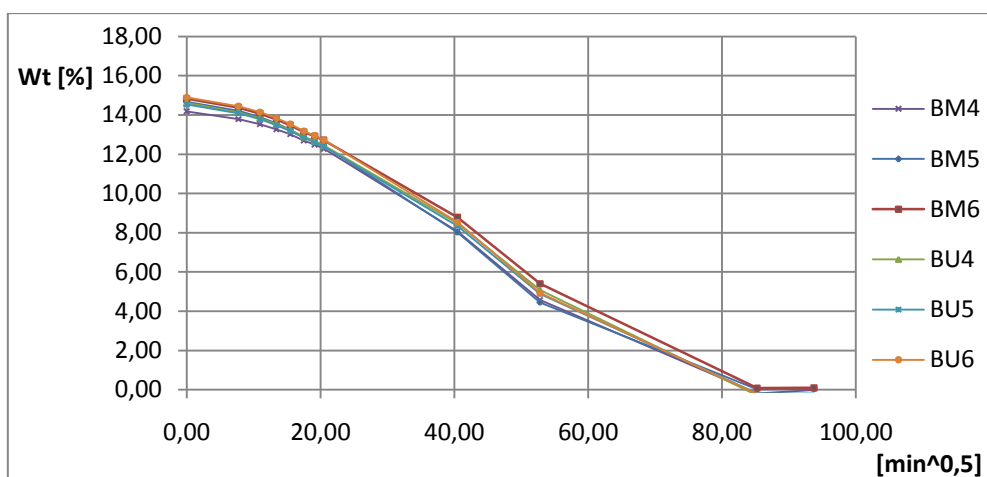


Figura 56 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa B.

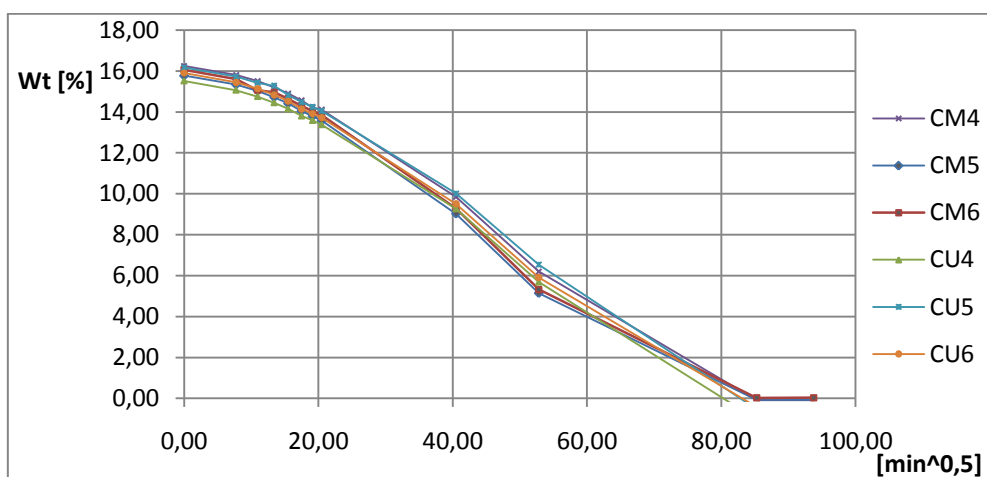


Figura 57 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa C.

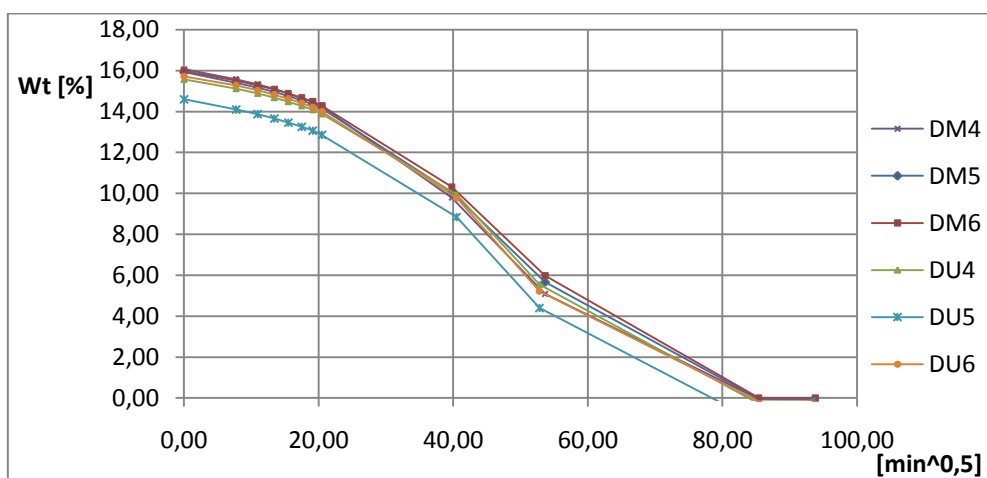


Figura 58 - Curvas de secagem aos 28 dias da argamassa D.

4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

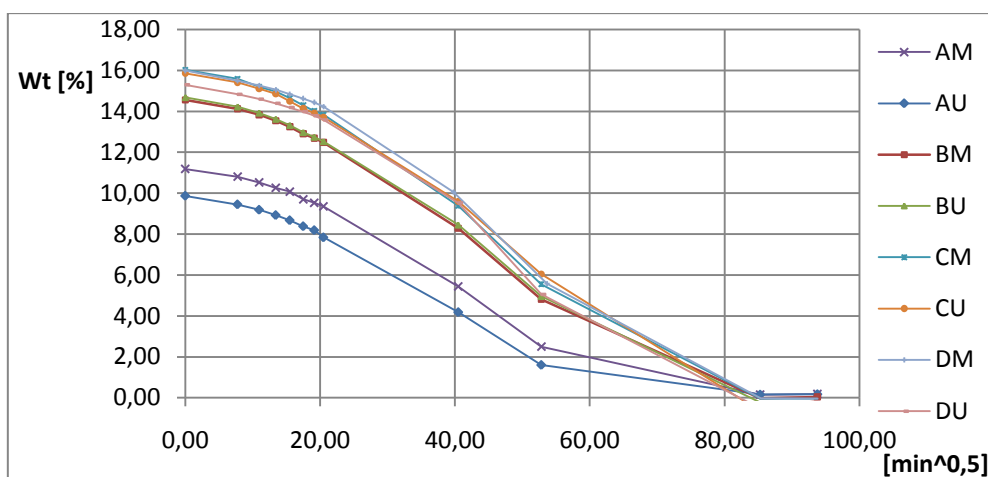


Figura 59 - Curvas de secagem aos 28 dias de todas as argamassas.

No Quadro 21, apresentam-se os valores do índice de secagem das diferentes argamassas. De registrar que a secagem é tanto mais rápida e fácil quanto menor o índice de secagem.

Quadro 21 - Valor do índice de secagem e respectivo desvio padrão das argamassas.

Arg.	Tipo de cura	I. Secagem
A	M	0,40 ± 0,12
	U	0,40 ± 0,00
B	M	0,52 ± 0,02
	U	0,50 ± 0,04
C	M	0,53 ± 0,02
	U	0,55 ± 0,01
D	M	0,55 ± 0,02
	U	0,54 ± 0,02
E	M	-
	U	-

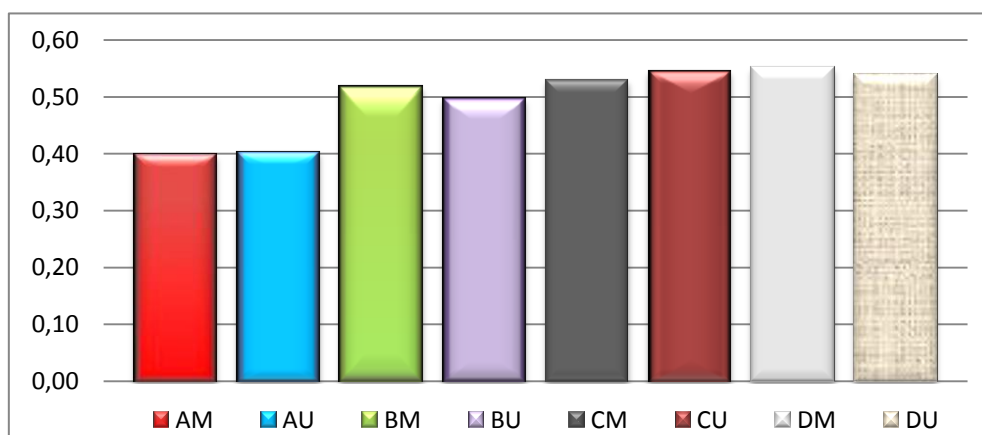


Figura 60 - Índice de secagem aos 28 dias de todas as argamassas.

Da análise efectuada ao Quadro 21, verifica-se que as argamassas A, só de cal, secam mais rapidamente do que as restantes argamassas. Verifica-se, também, que entre o tipo de cura e os valores do índice de secagem não existe uma influência directa, sendo que apenas nas argamassas B se regista uma diferença, pese embora muito pequena, entre as condições de cura. Nestas argamassas a cura em ambiente marítimo apresenta os maiores IS relativos; já nas argamassas C e D essa diferença é imperceptível.

Do exposto anteriormente é possível concluir que a introdução de um composto pozolânico, metacaulino, em quantidades crescentes não influencia a secagem das argamassas, sendo que qualquer que seja a sua percentagem de substituição o IS mantém-se sempre num patamar de valores muito próximos. Por outro lado existe uma diferença clara quando se compara argamassas só de cal sem metacaulino com argamassas com metacaulino, verificando-se uma ligeira dificuldade na secagem das segundas em relação às primeiras.

4.3.6. AVALIAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA

A caracterização da estrutura porosa das argamassas foi realizada através da determinação da porosidade aberta, de acordo com o procedimento descrito em 3.6.6., que permitiu avaliar o volume de poros presentes no interior das argamassas. Este ensaio foi realizado com uma amostragem de 3 provetes por argamassa e condição de cura.

Apresentam-se, no Quadro 22 e na Figura 61, os valores médios e respectivos desvio padrão da P_{ab} das diversas argamassas e condições de cura.

Quadro 22 - Porosidade aberta aos 28 dias de idade.

Arg.	Tipo de cura	Porosidade aberta [%]
A	M	$32 \pm 0,6$
	U	$33 \pm 1,3$
B	M	$31 \pm 0,1$
	U	$32 \pm 1,3$
C	M	$27 \pm 3,6$
	U	$32 \pm 0,8$
D	M	$27 \pm 2,7$
	U	$29 \pm 2,5$
E	M	-
	U	$31 \pm 2,0$

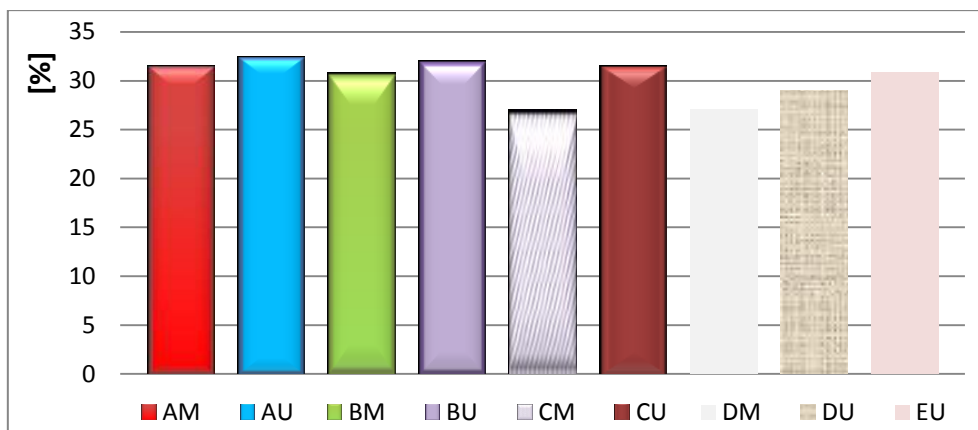


Figura 61 - Porosidade aberta das argamassas diversificadas aos 28 dias de idade.

Independentemente das condições de cura a que os provetes foram sujeitos, dentro do mesmo tipo de argamassa, os valores de P_{ab} foram bastante semelhantes entre si.

No entanto, este ensaio, com este tipo de argamassas, é muito sensível ao manuseamento dos provetes, destacando-se inclusivamente a aparência muito friável que todas as argamassas, excepto as A, apresentavam.

4.3.7. AVALIAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL

Como referido anteriormente só foram analisadas as argamassas aos 28 dias de idade. Os resultados destas análises estão em concordância com os valores obtidos para a caracterização mecânica das argamassas à mesma idade.

Os resultados obtidos no LNEC, permitem concluir que:

- As argamassas submetidas a cura em ambiente urbano (U) revelam que, mesmo com o aumento do teor de metacaulino, a formação de produtos pozolânicos é praticamente inexistente.
- No caso das argamassas submetidas a cura em ambiente marítimo (M) verifica-se um ligeiro aumento dos compostos pozolânicos obtidos com o aumento do teor em metacaulino em comparação com a cura em ambiente urbano (U). Isto significa que o metacaulino reage melhor em condições de humidade relativa supostamente superiores.
- Para ambas as curas à medida que o teor de metacaulino aumenta verifica-se uma diminuição da presença de portlandite, $(Ca(OH)_2)$, o que está de acordo com o esperado.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido insere-se no âmbito do projecto **FCT METACAL** e compreende a avaliação e a evolução das características das argamassas com diferentes teores de metacaulino com a idade e condições de cura em exposições naturais.

Num primeiro momento foi feita uma pesquisa bibliográfica de modo a adquirir competências que permitissem o conhecimento do tema e a sua abrangência, bem como um melhor enquadramento do programa de investigação proposto.

Posteriormente foram realizadas várias argamassas. A sua formulação englobou variações do teor de metacaulino que vieram a ser sujeitas a duas condições de cura distintas.

A campanha experimental elaborada no decorrer desta dissertação destacou alguns aspectos importantes relativamente às argamassas de cal aérea em pó, com e sem adição de metacaulino, sujeitas a dois tipos de cura distintos, e permitiu adquirir novos conhecimentos nestas matérias.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho houve constante preocupação com o manuseamento dos provetes, especialmente na fase de desmoldagem. Nesta altura os provetes ainda apresentavam pouca consistência e evidenciavam fragilidade elevada. Porém, este foi um risco assumido desde início como tentativa de cumprir os prazos estipulados para o desenrolar e a conclusão da dissertação.

As amassaduras iniciaram-se no dia 22 de Março de 2011 no DEC/FCT-UNL e no dia seguinte no LNEC. Sete dias mais tarde foram desmoldados os primeiros provetes (dias 29 e 30 de Março).

Nos primeiros dias de cura de alguns provetes (principalmente para determinação de E, capilaridade e secagem, e resistências a 90 dias) ocorreram dias de calor intenso, pouco expectável nessa altura do ano. Ainda alguns dos provetes não tinham 15 dias de cura quando foram atingidos por fortes precipitações (2 dias de chuva intensa e com granizo) que provocaram relevantes estragos na face exposta directamente à chuva. A essa data outros provetes das mesmas argamassas (nomeadamente para ensaios de resistências a 28 dias) não estavam ainda expostos por ainda não terem sido efectuados (por condicionamentos de moldes disponíveis).

Como o mês de Abril de 2011 foi caracterizado por condições climáticas muito diversificadas, que oscilaram entre muito calor e chuva intensa, suspeita-se que a reacção química entre a cal e o metacaulino possa ter ficado comprometida comparativamente ao que poderia ocorrer com condições de cura mais estáveis. Provavelmente essas condições permitiram que a cal carbonatasse, não reagisse com o metacaulino e não adquirisse resistências mais elevadas. Mas esta situação fica por comprovar.

Esta situação poderá explicar o facto de alguns provetes, sobretudo aqueles em que o teor de ligante (cal aérea) era menor e o do metacaulino maior (argamassa do tipo E), apresentarem maior degradação. Em alguns casos a face exposta chegou a perder quase 2 cm de material ficando estes provetes seriamente danificados e a sua análise comprometida.

Durante a fase de preparação das argamassas e a fase de ensaios verificou-se alguma dificuldade em reproduzir a normalização vigente. Este facto deveu-se sobretudo à falta de normas específicas para argamassas de cal aérea. Seguiram-se procedimentos definidos para o estudo em causa, com base em procedimentos que de há muito têm vindo a ser seguidos nomeadamente no LNEC e na UNL.

Os objectivos propostos servem de ponto de partida ao estabelecimento das conclusões aqui apresentadas que permitem uma compreensão global das relações existentes entre componentes, características e propriedades das argamassas.

Relativamente à influência das condições de cura os aspectos mais importantes a realçar são a grande dificuldade de endurecimento inicial dentro do molde das argamassas, especialmente das argamassas A, sem Mk, cujo endurecimento ocorre exclusivamente por carbonatação e, por isso, necessita do contacto com o CO_2 (que fica condicionado enquanto os provetes não são desmoldados)

No que se refere à incorporação de metacaulino nas argamassas, observa-se que esta não foi vantajosa uma vez que as argamassas A, só de cal sem Mk, apresentaram sempre maiores resistências, ao contrário do que se esperava. Verificou-se que entre as argamassas B e C houve um ligeiro aumento das resistências mecânicas quando a cal foi substituída parcialmente por metacaulino face às argamassas D e E. Esta constatação deixa antever que existe uma evolução quando o teor de metacaulino aumenta (argamassa B - 10% de substituição parcial de cal por Mk; argamassa C - 20 % de substituição parcial de cal por Mk). Contudo não se trata de uma constatação linear uma vez que tal aumento apenas ocorreu aos 28 dias de caracterização e somente para as argamassas B e C.

Seria de supor que a cura em ambiente marítimo (M) potenciase as características das argamassas com metacaulino, admitindo que essa cura ocorra com teor mais elevado de humidade relativa ambiente (o que não foi comprovado), mas mais uma vez tal situação só ocorreu aos 28 dias e para as argamassas B e C.

Os resultados não foram satisfatórios porque, de acordo com os ensaios químicos e mineralógicos, as curas proporcionadas não promoveram a reacção pozolânica até aos 28 dias de idade. Tal situação talvez possa ser justificada pelo estado de conservação dos provetes, que ficou desde muito cedo comprometido.

Ao analisar a consistência por espalhamento (Esp) verifica-se que houve uma preocupação de rigor no trabalho desenvolvido, sendo que o desvio padrão entre todas as amassaduras foi sempre muito reduzido e os valores de Esp muito próximos. As diferenças verificadas entre Esp das argamassas realizadas na UNL e no LNEC, dado os diferentes equipamentos utilizados, também

eram esperadas e encontram-se dentro de limites aceitáveis já que se pôde observar um padrão (20 ± 3 mm).

Quanto à análise do módulo de elasticidade (E) registou-se uma evolução com a idade de caracterização e foi possível identificar a influência da cura em ambiente marítimo (M), nas argamassas B e C, face à cura em ambiente urbano (U). Tal como seria de esperar ocorreu um aumento elevado na gama de valores do E entre os ensaios decorridos aos 28 dias e aos 60 dias; já a evolução para os 90 dias foi mais comedida. Contudo é importante destacar que as argamassas A, só de cal aérea sem Mk, foram sempre as que apresentaram valores mais elevados do E e que nenhuma das restantes argamassas se aproximou dos seus valores; esta situação não era esperada especialmente para idades de caracterização mais avançadas deixando antever alguns problemas nas restantes análises.

Através deste ensaio foi possível ter uma primeira ideia da influência do tipo de compactação; as argamassas CM' e DM' (realizadas no LNEC e sujeitas à cura em ambiente marítimo na UNL), apresentaram valores de E mais elevados face a argamassas iguais compactadas mecanicamente. Deste modo é possível admitir que a compactação manual das argamassas, que de algum modo produz um material mais compacto e resistente, não foi comparável com a mecânica.

A caracterização das argamassas do tipo E deixa antever a sua inadequabilidade para utilização futura.

A dúvida equacionada neste estudo está relacionada com os ensaios de resistência mecânica; tanto os ensaios de flexão, R_t , como os ensaios de compressão, R_c , suscitaram interrogações; nomeadamente quando comparados com os valores do módulo de elasticidade estes valores são muito baixos e não estão de acordo com o esperado. De referir ainda que, muito embora as diligências encetadas para que tal não sucedesse, na caracterização a 28 dias utilizaram-se três tipos de equipamentos semelhantes mas com células de carga distintas, o que também condicionou os resultados obtidos.

A argamassa A é a única que apresenta valores satisfatórios de R_t , sendo que as restantes apresentam valores muito baixos e não deixam antever nem a influência da cura em ambiente marítimo (M) para argamassas que contêm metacaulino, nem uma evolução temporal das suas resistências. As resistências iniciais aos 28 dias (únicas obtidas com alguns provetes que não sofreram condições atmosféricas extremas nos primeiros dias de idade), são as únicas que mostram quer a influência da cura M, quer a influência do teor de metacaulino. Mais uma vez, através deste ensaio foi possível comprovar a influência do tipo de compactação: as argamassas CM' e DM' (realizadas no LNEC e sujeitas à cura em ambiente marítimo na UNL), apresentaram valores de R_t mais elevados face a argamassas iguais compactadas mecanicamente.

Através deste ensaio, é possível antever a inadequabilidade das argamassas do tipo E para utilização futura. Estes resultados foram fortemente condicionados pelo estado geral de alguns dos provetes (elevada degradação).

Relativamente ao ensaio de resistência à compressão, R_c , a elevada degradação dos provetes, apesar de poder ter influenciado os resultados, não impediu a sua realização. Estes resultados também não estão de acordo com o evidenciado pelo módulo de elasticidade (E) mas surgem na sequência do indicado pelo ensaio anterior (R_t). Como este ensaio decorreu aos 28, 60 e 90 dias, foi possível identificar um patamar de valores muito próximo para todas as argamassas, excepto as A, não se verificando nem influência directa do tipo de cura, nem do teor de metacaulino.

Também aqui é possível distinguir os dois processos de compactação utilizados, uma vez que as argamassas CM' e DM' (realizadas no LNEC e sujeitas à cura em ambiente marítimo na UNL) apresentaram valores de R_c mais elevados face a argamassas iguais compactadas mecanicamente.

Mais uma vez, através deste ensaio, é possível antever a inadequabilidade das argamassas do tipo E para utilização futura. Estes resultados foram fortemente condicionados pelo estado geral de alguns dos provetes (elevada degradação).

Quanto à análise da absorção de água por capilaridade aos 28 dias foi possível verificar que as argamassas A, sem Mk, são as que apresentam menor velocidade de absorção capilar inicial de água, as que demoram mais tempo a estabilizar e as que absorvem menor quantidade de água por capilaridade. Do mesmo modo, são as que possuem menor índice de secagem, denotando uma secagem mais fácil. Todas as outras argamassas não apresentam variação substancial entre si e não se verifica influência significativa da condição de cura nem do teor de metacaulino.

O ensaio de porosidade aberta não permitiu registar nenhum padrão, sendo que todos os valores estão muito próximos.

Finalmente, volta a sublinhar-se que o aspecto mais condicionante do estudo foi a impossibilidade de lidar com o factor “tempo” - a elevada amplitude térmica do mês de Abril e as fortes precipitações ocorridas condicionaram o desenrolar do desenvolvimento experimental e não permitiram aferir certos aspectos que se pretendiam apreciar.

A título de exemplo, também pela inexistência de registo contínuo das condições de exposição, não foi possível verificar de todo a influência da cura marítima (M) em argamassas com Mk face à cura em ambiente urbano (U), e não foi possível registar uma evolução padrão com os teores de substituição crescente de Mk com a idade de caracterização. No entanto, verificou-se que estas argamassas são muito sensíveis à cura, admitindo-se ser necessário garantir uma cura mais suave e húmida para que se possam dar as reacções pozolânicas e as argamassas possam adquirir resistência mecânica antes de serem expostas a condições climáticas severas.

Importa referir que, através do Instituto de Meteorologia de Portugal, foi possível ter acesso à média das condições climáticas dos primeiros dias de cura das argamassas. Verificou-se desta forma uma ligeira diferença entre as duas exposições naturais estudadas, ambiente marítimo (M) e ambiente urbano (U). As primeiras argamassas foram expostas nos primeiros dias de Abril em que se registaram temperaturas na ordem dos 19°C e humidade relativa de cerca de 66% (LNEC - cura urbana) e temperaturas de 18°C e 71% de humidade relativa (UNL - cura marítima). Informações

fornecidas pela análise química mostram que as reacções pozolânicas necessitam de humidades muito elevadas para reagirem ($H_r \geq 95\%$) o que não se verificou em nenhum dos ambientes.

Relativamente aos tipos de cura escolhidos é importante referir que a curto prazo (ensaios decorridos até 90 dias) é possível os dois ambientes não apresentarem características suficientemente distintas que possibilitem uma influência directa nas propriedades das argamassas. Admite-se contudo que o ambiente marítimo (M) possa apresentar um teor de humidade mais elevado, enquanto que o ambiente urbano (U) além de menores níveis de humidade face ao primeiro também possa apresentar maiores níveis de poluição. Desta forma é possível que para este tipo de estudo estas possam não ser as condições de cura ideais.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em trabalhos futuros que podem prosseguir a investigação desenvolvida nesta dissertação consideram-se importantes os seguintes aspectos:

- Aos 28 dias as argamassas com base em cal aérea vão estar muito pouco carbonatadas, as reacções pozolânicas (que são lentas) podem ainda estar a decorrer e as resistências mecânicas estar em fase de desenvolvimento; em virtude de possíveis diminuições de características a idades curtas é pois importante analisar as argamassas a idades mais avançadas.

- Deve fazer-se uma caracterização com um intervalo temporal reduzido para se perceber a evolução por patamares do comportamento geral das argamassas.

- Efectuar o registo de todos os inconvenientes e erros de modo a viabilizar a aprendizagem e a evolução, estes devem ser corrigidos em possíveis reproduções do desenvolvimento experimental; a reprodução do estudo assume capital importância mostrando-se essencial que todas as metodologias e procedimentos adoptados possam ser novamente realizados.

- Em estudos futuros sugere-se que o traço volumétrico ligante:agregado das argamassas seja revisto e que possivelmente o traço 1:2 seja o mais adequado.

- Nos primeiros dias de cura estas argamassas devem ser protegidas com uma espécie de rede por forma a garantir a integridade dos constituintes, esta é uma medida actualmente obrigatória na maioria das obras de construção.

A maior dificuldade registada neste estudo prendeu-se com saber lidar com as condições atmosféricas e com o estado dos provetes. Em face disso, é essencial destacar tal situação em desenvolvimentos futuros de caracterização de argamassas em exposição natural.

O estudo desenvolvido foi fortemente condicionado pelas condições de cura a que os provetes foram sujeitos, sendo que exceptuando os ensaios que decorreram aos 28 dias os restantes ensaios foram influenciados pelo estado de conservação dos provetes, que se encontrava muito degradado. O principal motivo da degradação acentuada dos provetes foram as fortes precipitações

ocorridas durante o mês de Abril. De forma a controlar esta situação sugere-se que em estudos futuros possa ser utilizada uma estrutura de suporte para os provetes.

Essa estrutura poderá ser construída em aço ou alumínio e deverá ter a forma de 'V' ao contrário para servir de base de sustentação. Este suporte irá permitir ao provete de argamassa uma exposição ambiente mais perto da real, além de simular melhor a queda da chuva e evitar a degradação precoce do provete, uma vez que irá evitar a queda directa da chuva e uma acção mais violenta desta. Desta forma, numa situação de precipitação, a água das chuvas irá escorrer pela face do provete em vez de bater directamente criando um efeito tipo 'chapa'.

Outra solução poderá passar por colocar como face exposta às condições ambientes a face livre do provete quando moldado. Esta face, como foi rasada e houve o arraste dos finos, pode simular melhor a realidade.

Como este estudo foi desenvolvido em paralelo com o de outros dois colegas, a gestão da organização assume importância extrema. Dado o volume de trabalho efectuado não foi possível colocar todos os provetes de todas as argamassas (A, B, C , D e E) em simultâneo na cura respectiva. Desta forma todos os provetes estariam sujeitos exactamente às mesmas condições atmosféricas que variam dia a dia e semana a semana. Porém, esta situação deve ser cumprida em desenvolvimentos experimentais futuros de provetes em exposição natural.

Ao se tratar de resistências iniciais de argamassas à base de cal aérea (resistências muito baixas) qualquer factor, mesmo que insignificante se afigure, poderá representar variações de resistência percentualmente muito elevadas a longo prazo. Em face disso, a cura em simultâneo dos provetes das diversas argamassas, apresenta-se como uma mais-valia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, C. (2008). *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

ALVAREZ, J., SEQUEIRA, C. e COSTA, M. (2007). Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. 2º Congresso Nacional de Argamassas Construção. Lisboa, APFAC.

AMBROISE, J., MAXIMILIEN, S. e PERA, J. (1994). *Properties of metakaolin blended cements*. Cement and Concrete Research, Science Direct: Elsevier. Vol.1, nº4: pp. 161-168.

BODDY, A., HOOTON, R. D. e GRUBER, K. A. (2001). *Long-term testing of the chloride penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin*. Cement and Concrete Research, Science Direct: Pergamon. Vol.31, nº5: pp. 759-765.

BOTAS, S. (2009). *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

BRITO, V. (2009). *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

BURROWS, R. W. (1998). *The visible and invisible cracking of concrete*. ACI Monograph, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA. nº11: pp. 78-82.

CAVACO, L. (2005). *Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

CEN (1999/2004/2006). EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels.

CEN (1999/2006). EN 1015-11:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.

CEN (2002). EN 1015-18:2002 Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.

CEN (2009). EN 15801:2009. Conservation of cultural property. Test ,methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.

CEN (1999). EN 1936:1999. Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Brussels.

CEN (1998/2006). EN 1015-2:1998/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels.

CEN (2010). EN 459-1:2010. Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria. Brussels.

CHAROLA, A. E. e HENRIQUES, F. A. (1999). *Hydraulicity in lime mortars revisited*. International RILEM Workshop on Historic Mortars. RILEM Publications. Characteristics and Tests, Paisley, Scotland. Vol.1, pp. 95-104 .

CHAROLA, A. E., FARIA, M. P., McGHIE, A. e HENRIQUES, F. A. (2005). *Pozolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure*. Restoration of Buildings and Monuments. Vol.11, nº2, pp.111-118.

COUTINHO, J. S. (2002). *Materiais de Construção 2 - parte 1 - Ligantes e caldas.*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.

COUTINHO, S. (1963). *La Puzolana y sus propiedades*, Memória nº211. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

CSTB (1993). Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation. Modalités d'essais. Cahier CSTB 2669-4.

DAVIDOVITS, J. (1994). *Properties of geopolymers*. First international conference of alkaline cements and concretes. Kiev, Ukraine. pp. 131-149.

DING, J. e LI, Z. (2002). *Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete*. ACI Material Journal. Vol. 99, nº4: pp. 393 - 398.

FARIA, M. P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas contributo para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

FARIA, M. P. (2009). *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars*. Repair mortars for Historic Masonry. RILEM Publications. Delft, The Netherlands, pp. 99-110.

FARIA, M. P. (2011). *Documento com procedimentos Metacal*.

FARIA, M. P. e HENRIQUES, F. A. (2004). *Current mortars in conservation: an overview*. Aedificato Publishers. Restoration of Buildings and Monuments. Vol.10, nº6: pp. 609-622.

FARIA, M. P. e MARTINS, A. (2011). *Influence of Curing Conditions on Lime and Lime-Metakaolin Mortars*. XII DBMC - International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto.

GONZÁLEZ, M. e NAVARRO, J. (2006). *Assesment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Pratical case study*. Building and Environment, Vol. 41, pp.902-909.

HERZOG, H. J. (2001). *What Future for Carbon Capture and Sequestration?* Environment Science Technology. nº35: pp.148-153.

IPQ (2002). NP EN 1097-3:2002. Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e volume de vazios. Monte de Caparica.

IPQ (2006). NP EN 196-1:2006. Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Monte de Caparica.

IPQ (2006). NP EN 14146:2006. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Monte de Caparica.

IPQ (2000). NP EN 933-1:2000. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Monte de Caparica.

ISO (2000). ISO 3310-1:2000. *Test Sieves -Technical requirements testing - Part 1: Test Sieves of metal wire cloth*. Switzerland.

JACKSON, F. H. (1946). *The durability of concrete in service*. ACI Journal, October 1946, Vol.18, nº.2: pp. 165-180.

KHATIB, J. M. e CLAY, R. M. (2003). *Absorption characteristics of metakaolin concrete*. Pergamon - Cement and Concrete Research, nº.20.

MALHOTRA, V. M. (1978). *Use of recycled concrete as new aggregate*. Proceedings of the Symposium on Energy and Resource Conservation on the concrete Industry CANMET, Ottawa, Canada. Rep. nº. 76-78: pp 4-16.

MALHOTRA, V. M. (1999). *Making concrete greener with fly ash*. Concrete International, May 1999, Vol. 21, nº. 5: pp. 61-66.

MARGALHA, M., VEIGA, M. e BRITO, J. (2007). *Influência das areias na qualidade das argamassas da cal aérea*. Lisboa : APFAC.

MARTIN-CALLE, S. (1989). *Pouzzolanicité d'argiles thermiquement actives: Influence de la minéralogie et des conditions de calcination*. INSA - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França, 1989.

MARTINS, A. (2010). *A influência das condições de cura em argamassas de cais aéreas com e sem adição de metacaulino*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Escola Superior de Tecnologia do Barreiro - Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal.

MEHTA, P. K. (1991). *Concrete in marine environment*. Cement and Concrete Research, Science Direct: Elsevier. Vol.14, nº2: pp. 16-21.

MEHTA, P. K. (1994). *Mineral admixtures for concrete - An overview of recente developments*. University of Newhampshire, Durham: ASCE, pp. 243-256.

MEHTA, P. K. (2001). *Reducing the environment impact of concrete for sustainable development*. International workshop on sustainable development and concrete technology. pp. 4-14.

MEHTA, P. K. e BURROWS, R. W. (2001). *Building durable structures in 21 st century*. The Indian Concrete Journal. pp. 437-443.

RATO, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

ROVNANÍK, P. (2010). *Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer*. Construction Building Materials. nº24: pp. 1176-1183.

SAMPAIO, J., COUTINHO, J. S., e SAMPAIO, M. N. (2004). *Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino*. 43º Congresso Brasileiro do Concreto. Porto, Portugal.

SILVA, A. S. R. (2008). Sistemas à base de cimento. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Bahia, Brasil.

TORGAL, F. P. e JALALI, S. (2008). Tendências para a sustentabilidade dos materiais de construção. Engenharia e Vida nº.42. Janeiro de 2008.

VEIGA, M., FRAGATA, A., VELOSA, A., MAGALHÃES, A. e MARGALHA, G. (2010). *Lime Based Mortars: Viability for use as substitution renders in historical buildings*. International Journal of Architectural Heritage, nº.4: pp. 177-195.

VEIGA, R. (2003). Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa, Maio de 2003.

VELOSA, A. (2007). Argamassas com pozolanas para aplicação na conservação de edifícios. Beja: Oficina Técnicas Tradicionais de Revestimento.

WILD, S., KHATIB, J. M. e JONES, A. (1996). *Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplastised MK concrete*. Cement and Concrete Research, nº. 26: pp. 1537-1544.